

DR MLADEN POPOVIĆ

SENZORI U ROBOTICI



VIŠA ELEKTROTEHNIČKA ŠKOLA
BEOGRAD, 1996

Recenzenti: *akademik Miomir Vukobratović*
prof. dr Ljubiša Draganović

Izdavač: *Viša Elektrotehnička škola, Beograd, Vojvode Stepe*
283, tel. 471-099, fax. 471-365

Tehnička obrada: *autor*

Korice: *Darko Raubal*

Lektor: *dr Mirjana Popović*

Štampa: *Čigoja štampa, Beograd, Studentski trg 15*
tel. 625-954

Tiraž: 300

Štampanje knjige finansijski pomogli:

Ministarstvo za nauku i tehnologiju Republike Srbije
Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“
Institut „Mihajlo Pupin“
LOLA KORPORACIJA
RAPEL

CIP – Katalogizacija u publikaciji
Narodna biblioteka Srbije, Beograd

007.52:681.586(075.8)

POPOVIĆ, Mladen

Senzori u robotici / Mladen Popović –
Beograd: Viša elektrotehnička škola, 1996 (Beograd: Čigoja štampa).
– 255 str. : graf.prikazi ; 24 cm
Tiraž 300. – Bibliografija uz svako poglavlje. – Registar
ISBN 86-82589-06-0

a) Roboti – Upravljanje b) Merni instrumenti, senzorski
ID=4495340

Majci

PREDGOVOR

U knjizi je dat pregled današnjeg stanja u tehnologiji izrade senzora u robotici i perspektive razvoja.

Senzor je uređaj koji pretvara merenu fizičku veličinu u električni signal, odlikuje se malim dimenzijama, visokim tehnološkim vrednostima i sposobnošću za obradu informacija. Ove osobine do punog izražaja dolaze u primeni u robotici. Da bi robot sa jednostavnim pokretima mogao da izvodi operacije u promenljivoj okolini, neophodne su informacije koje se dobijaju pomoću senzora. Za uspešan rad robotu su potrebne jednostavne binarne informacije o fazama manipulativnih operacija, informacije proporcionalne merenim veličinama i kompleksne informacije u obliku slike. U knjizi su opisani principi rada, konstrukcija i obrada signala senzora koji su razvijeni u okviru robotike. O standardnim mernim sensorima opšte namene autor je detaljnije pisao u svojoj knjizi "Senzori i merenja".

Knjiga "Senzori u robotici" je prvenstveno namenjena studentima elektrotehnike, mašinstva i tehnologije koji izučavaju merenja i robotiku, studentima poslediplomskih studija, ali i stručnjacima koji se u svojoj praksi bave specijalnim merenjima, tehnikama prepoznavanja ili upravljanjem robotima. Namera autora je da svoj višegodišnji rad na proučavanju savremene tehnike senzora i predavačko iskustvo u ovim oblastima predstavi širem krugu korisnika.

Zahvalnost za niz korisnih sugestija autor upućuje recenzentima akademiku Miomiru Vukobratoviću i prof. dr Ljubiši Draganoviću i kolegama koji su pokazali interesovanje za izdavanje ove knjige. Posebnu zahvalnost pripada Ministarstvu za nauku Republike Srbije, institutima I preduzećima čija je finansijska podrška doprinela da se knjiga pojavi u javnosti.

Beograd, januara 1996.

Autor

SADRŽAJ

1. UVOD	7
1.1. ROBOTI.....	7
1.2. SENZORI.....	12
1.2.1. Senzor kao merno-informacioni uređaj	12
1.2.2. Podela senzora u robotici	17
LITERATURA.....	19
2. SENZORI BLIZINE	21
2.1. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE	21
2.2. ELEKTROMEHANIČKI SENZORI.....	25
2.3. ELEKTROMAGNETSKI SENZORI BLIZINE.....	26
2.3.1. Induktivni senzori	26
2.3.2. Specijalni elektromagnetski senzori.....	33
2.4. KAPACITIVNI SENZORI BLIZINE.....	37
2.5. ULTRAZVUČNI SENZORI BLIZINE.....	39
2.5.1. Princip rada	39
2.5.2. Problemi primene.....	40
2.5.3. Gradnja i primena.....	42
2.6. OPTOELEKTRONSKI SENZORI BLIZINE.....	47
LITERATURA	52
3. SENZORI SILE I MOMENTA	53
3.1. OPŠTE KARAKTERISTIKE MERENJA SILE I MOMENTA	53
3.2. ASEMBLIRANJE I KONTAKTNE SILE	56
3.3. KLASIČNI SENZORI U ZGLOBU ŠAKE	58
3.3.1. Zglob sa pasivnim prilagodavanjem.....	58
3.3.2. Senzorizovani RCC.....	61
3.3.3. Virtuelni RCC	62
3.3.4. Senzor u zglobu šake	63
3.4. KOMPAKTNI SENZORI SILE.....	65
3.4.1. Principi gradnje višekomponentnih senzora sile	65
3.4.2. Šestokomponentni senzori sa mernim trakama.....	68
3.4.3. Induktivni šestokomponentni senzori sile	71
3.5. SENZORI SILE NA PRSTIMA.....	72
3.6. SENZORI SILE IZVAN ROBOTA.....	74
LITERATURA	76
4. TAKTILNI SENZORI	78
4.1. PRINCIPI GRADNJE	78
4.1.1. Taktilna percepcija	78
4.1.2. Realizacija taktilne percepcije.....	81
4.2. OTPORNIČKI TAKTILNI SENZORI.....	87
4.2.1. Elastični otpornici	87
4.2.2. Taktilni senzori sa slojem elastomera na štampanoj ploči	88
4.2.3. Otpornički senzori sa nizovima elektroda	89
4.2.4. Problemi merenja otpornosti taktela.....	92
4.2.5. Preključivanje taktela	94
4.2.6. Otpornički senzor sa VLSI kolima	95
4.3. ELEKTROMAGNETSKI TAKTILNI SENZORI	97
4.3.1. Induktivni	97
4.3.2. Magnetoopornički	98
4.3.3. Magnetoelastični	103
4.4. KAPACITIVNI TAKTILNI SENZORI.....	105
4.4.1. Prostorna rezolucija	105

4.4.2.	Primena pločastih kondenzatora.....	106
4.4.3.	Primena cilindričnih kondenzaora.....	110
4.5.	PIJEZOELEKTRIČNI TAKTILNI SENZORI.....	112
4.5.1.	Princip rada.....	112
4.5.2.	Konstrukcija matičnog senzora.....	113
4.5.3.	Ravni pjezoelektrični senzor.....	115
4.6.	ULTRAZVUČNI TAKTILNI SENZORI.....	117
4.7.	OPTOELEKTRONSKI TAKTILNI SENZORI.....	118
4.7.1.	Primena optoelektronskog para.....	118
4.7.2.	Primena optičkih vlakana.....	120
4.7.3.	Akrilatni senzor.....	121
4.8.	INTEGRISANI SILICIJUMSKI SENZORI.....	122
4.8.1.	Principi gradnje.....	122
4.8.2.	Tehnika nagrizaja Si tela.....	123
4.8.3.	Mikromehanička obrada površinskih slojeva.....	124
4.9.	TERMIČKI TAKTILNI SENZORI.....	126
4.9.1.	Principi gradnje.....	126
4.9.2.	Termootpornici.....	128
4.9.3.	Piroelektrični.....	131
4.9.4.	Termoelementi.....	132
3.10.	UPOREDNI PREGLED.....	136
	LITERATURA.....	140
5.	SENZORI ULTRAZVUČNE VIZIJE.....	142
5.1.	PRINCIPI GRADNJE.....	142
5.1.1.	Ultrazvučna percepcija.....	142
5.1.2.	Tehnika i tačnost merenja rastojanja.....	143
5.1.3.	Tehnike prepoznavanja.....	144
5.2.	MEHANIČKO SKENIRANJE.....	145
5.3.	ELEKTRONSK OSKENIRANJE.....	148
5.3.1.	Princip.....	148
5.3.2.	Pojednostavljeno elektronsko skeniranje.....	150
5.4.	POVEĆANJE TAČNOSTI MERENJA.....	153
	LITERATURA.....	157
6.	SENZORI VIZIJE.....	158
6.1.	VEŠTAČKA VIZIJA.....	158
6.1.1.	Osnovni pojmovi.....	158
6.1.2.	Procesiranje slike.....	159
6.1.3.	Klasifikacija likova.....	162
6.1.4.	Analiza scene.....	173
6.2.	PRIMENA SITEMA VIZIJE U ROBOTICI.....	175
6.2.1.	Kontrola kvaliteta.....	176
6.2.2.	Vodenje robota.....	177
6.2.3.	Prepoznavanje mikroorganizama.....	178
6.3.	KARAKTERISTIKE SENZORA VIZIJE.....	181
6.3.1.	Principi gradnje.....	181
6.3.2.	Tehnike osvetljavanja.....	184
6.3.3.	Veličina senzorske matrice i parametri senzora vizije.....	186
6.4.	ELEKTRONSKE KAMERE.....	188
6.4.1.	Vidikon kamere.....	188
6.4.2.	Poluprovodničke (CCD) kamere.....	191
6.4.3.	Kolor kamere.....	197
6.4.4.	Adaptacija komercijalnih kamera.....	199
6.5.	3D-VIZISENZORI.....	201
6.5.1.	Metode 3D-vizije.....	201
6.5.2.	3D-vizisenzor sa fokusiranjem slike.....	202
6.5.3.	3D-vizisenzori sa strukturnim svetlom.....	203
6.5.4.	3D-vizisenzori na bazi laserskog daljinara.....	207
6.6.	SPECIJALNI SENZORI VIZIJE.....	217
6.6.1.	Vizisenzori sa optičkim vlaknima.....	217
6.6.2.	Dinamički senzor vizije.....	220
6.6.3.	Infracrveni senzori vizije.....	229
	LITERATURA.....	228
	INDEKS POJMOVA.....	231

1

UVOD

1.1. ROBOTI

Robot se obično definiše kao računarski upravljani sistem koji:

- izvodi određene radne operacije;
- može da se kreće u prostoru radi izvršavanja radnog zadatka.

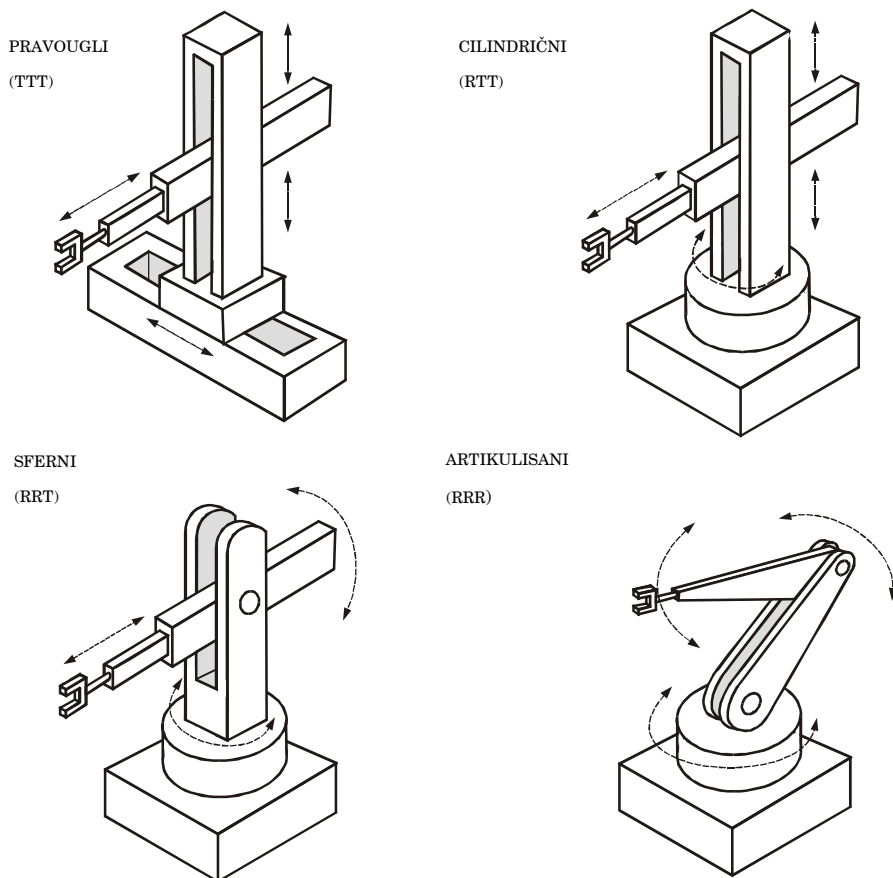
Navedena definicija ne precizira obim osnovnih osobina, ali je bitno da podrazumeva manju ili veću samostalnost robota u kretanju i delovanju.

Industrijski manipulacioni robot je preciznije određen u odnosu na opštu definiciju. To je računarski upravljani, reprogramabilni višenamenski manipulator koji je projektovan tako da zamenjuje čoveka u obavljanju određenih poslova. Industrijski robot omogućava pomeranje materijala, komada ili alata radi izvršavanja raznovrsnih zadataka, uključujući inspekciju, merenje, verifikaciju i proizvodnju delova, te njihovo sastavljanje u finalni proizvod. U skladu s tim, industrijski robot sastoji se od manipulatora kao mehaničkog dela koji se pokreće i upravljačkog sistema koji određuje i koordinira kretanje i delovanje robota. Manipulator je napravljen kao kinematički lanac od čvrstih segmenata spojenih pomoću zglobova koji omogućavaju rotaciono i translatorno pomeranje vrha robota. Jedan kraj robota pričvršćen je za nepokretnu osnovu, a drugi kraj je slobodan i na njemu se nalazi završni mehanizam, tj. hvataljka ili neki alat koji neposredno izvršava radni zadatak.

Manipulator se može podeliti u dva dela: minimalnu konfiguraciju i završni mehanizam. Minimalna konfiguracija (robotska ruka) je mehanizam sa tri zglobova koji omogućavaju pozicioniranje vrha završnog mehanizma (robotske šake) na željeno mesto u prostoru. U zavisnosti od kombinacije zglobova postoje različiti

tipovi minimalne konfiguracije, sa karakterističnim načinom kretanja i oblikom radnog prostora, (slika 1.1):

- pravougaoni, koji ima tri ose translacije (TTT), sa kretanjem segmenata duž tri međusobno upravne ose i radnim područjem u obliku kvadra;
- cilindrični, koji ima jednu osu rotacije i dve ose translacije (RTT), sa radnim prostorom u obliku cilindra ili dva koncentrična cilindra;
- sferni, koji ima dve ose rotacije i jednu osu translacije (RRT), sa radnim područjem u obliku dela sfere ili sferne ljuske;
- zglobovi, koji ima tri ose rotacije (RRR) i radno područje u obliku polulopte.



1.1. Osnovni tipovi minimalne konfiguracije

Završni mehanizam manipulatora je uređaj prilagođen za neposredno obavljanje radnog zadatka (slika 1.2). Završni mehanizam ima jedan, dva ili tri stepena slobode neophodna za dopunsko kretanje manipulatora. Industrijski manipulacioni roboti najčešće imaju četiri do šest stepeni slobode, pri čemu:

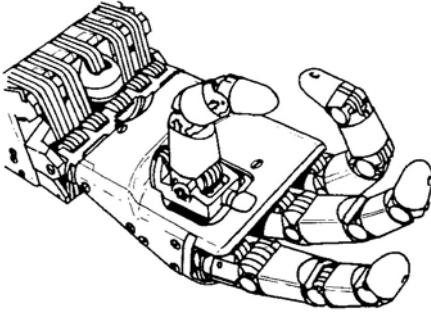
- tri stepena slobode minimalne konfiguracije služe za pozicioniranje završnog mehanizma u određenu tačku prostora;
- četiri stepena neophodna su kada je pozicioniranje kombinovano sa jednostavnijim operacijama kod montaže, prenošenja predmeta, ili opsluživanja prese;
- peti stepen slobode zahteva se kod pozicioniranja sa delimičnom orijentacijom, tj. kod operacija gde je vrh šake (alata) potrebno dovesti u željenu tačku uz istovremeno poklapanje ose šake sa zadatim pravcem;
- šest stepeni slobode omogućava najsloženije manipulativne operacije nastale kombinacijom pozicioniranja i potpune orijentacije, tj. svugde gde je potrebno vrh šake dovesti u određenu tačku, njenu osu poklopiti sa zadatim pravcem i još zakrenuti šaku za neki ugao oko tog pravca.

Treba napomenuti da robot može da ima i veći broj stepeni slobode kretanja nego što je dovoljno za realizaciju zadatka. Suvišni, redundantni stepeni slobode kretanja omogućavaju robotu da izvrši zadatak krećući se na različite načine, pa tada sistem upravljanja treba da odredi optimalno kretanje u skladu sa određenim kriterijumom.

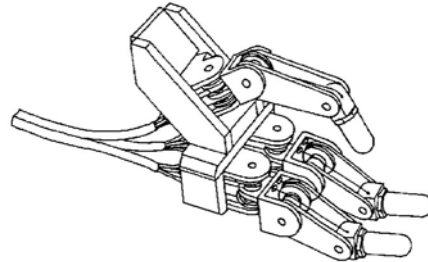
Primena. Roboti (manipulatori) primenjuju se danas u elektronskoj, metalskoj, metaloprerađivačkoj, prehrambenoj i automobilskoj industriji, u rudarstvu, u vasijskim i podmorskim istraživanjima – odnosno u svim granama ljudske delatnosti gde se radi o zamornim, opasnim ili preciznim radnim operacijama. Sa robotima se postiže ujednačen kvalitet proizvoda, veća produktivnost i manji troškovi proizvodnje i prevazilazi nedostatak kvalifikovane radne snage.

Ilustrativni su podaci da je prvi industrijski robot bio namenjen za tačkasto zavarivanje i da je bio instaliran 1961. u automobilskom koncernu General Motors (GM), da je 1970. u SAD bilo ukupno 200 robota, a da je 1991. samo u GM bilo više od 14 000. Najveći broj robota instaliran je u visoko razvijenim industrijskim zemljama. Smatra se da na Japan otpada oko jedne

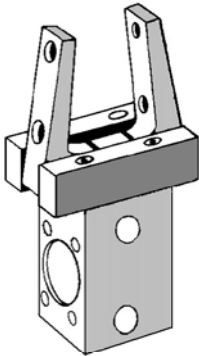
trećine svih robota u svijetu. Prva naučna konferencija o robotima održana je 1970. (The First National Symposium on Industrial Robots, Illinois Institute of Technology in Chicago).



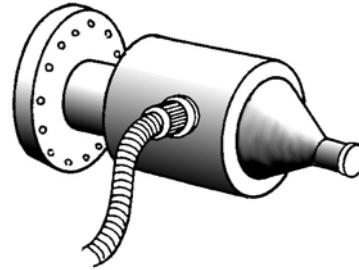
ŠAKA SA ČETIRI PRSTA



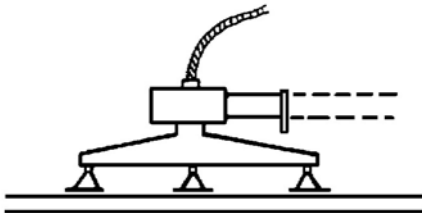
ŠAKA SA TRI PRSTA



HVATALJKA



PRSKALICA



SISALJKA



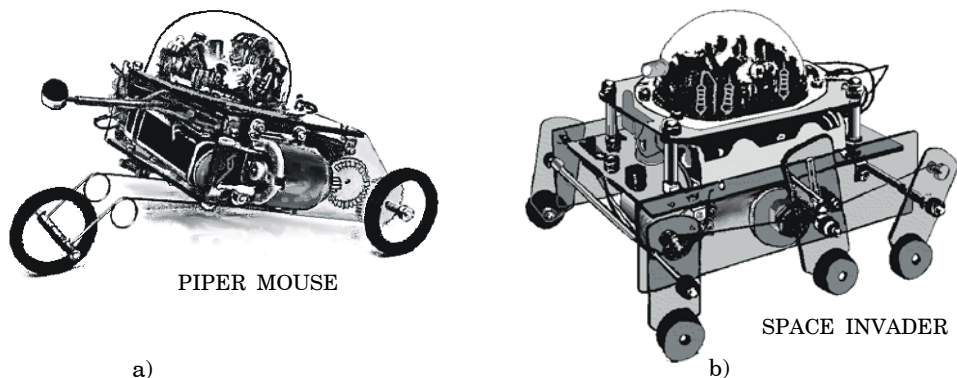
KLEŠTA

Slika 1.2. Različiti oblici završnog mehanizma

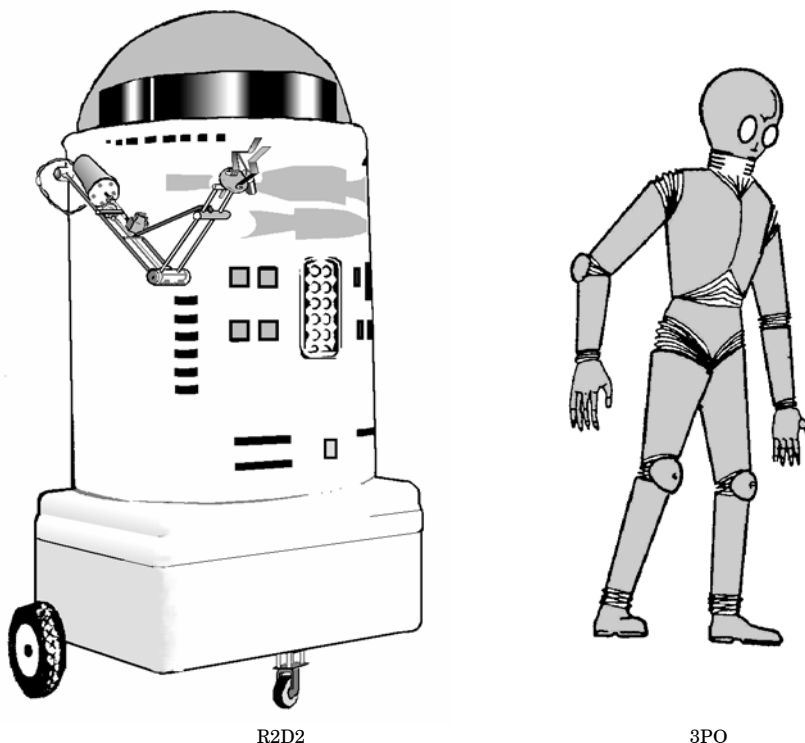
Ograničenja u primeni. Smatra se da je fabrikacija proizvoda u srednjim i malim serijama idealna za industrijske robote. Međutim, današnji industrijski roboti mogu da ponavljaju relativno ograničen broj operacija, pa su većinom zastupljeni na automatizovanim linijama za velikoserijsku proizvodnju.

Drugim rečima, industrijski roboti primenjuju se u dobro strukturiranoj okolini, tj. za dobro poznate i ponovljive radne zadatke koji se mogu programirati unapred. U izvesnoj meri roboti mogu da se prilagode promenama radne okoline. To je posebno izraženo kod autonomnih (pokretnih) robota. Pokretni roboti kreću se u prostoru pomoću hodajućeg mehanizma sa više nogu (hodajuće mašine) ili pomoću platforme sa točkovima. Za realizaciju radnih zadataka imaju ugrađen odgovarajući manipulator. Mobilni robot je veoma složena mašina i zasada ima skromnu primenu u industriji. Mnogi problemi u vezi sa njihovim kretanjem, upravljanjem i tehnologijom izrade nisu još rešeni na zadovoljavajući način.

Ogromni istraživački naponi ulažu se u razvoj robotike i sigurno je da će uzori iz sveta filma i mašte postajati sve više realnost. Na slici 1.3 prikazani su modeli pokretnih robota koji se upotrebljavaju kao univerzitetska učila. „*Piper Mouse*“ je robot upravljani zvučnim signalima (slika 1.3.a), a „*Space Invader*“ je robot opremljen infracrvenim senzorima za detekciju prepreka (slika 1.3b). Na slici 1.4 su roboti iz filma „*Rat zvezda*“. Robot R2D2 je namenski razvijen za univerzitetsku nastavu i istraživanja. U časopisu „*Radio Electronics*“ tokom 1980. objavljene su detaljne šeme za njegovu konstrukciju.



Slika 1.3. Pokretni roboti - univerzitetska učila



Slika 1.4. Mobilni roboti iz filma „Rat zvezda“

1.2. SENZORI

1.2.1. Senzor kao merno-informacioni uređaj

Definicija senzora. Merenje ima posebno mesto u sistemu savremenih nauka jer daje kvantitativne informacije o objektu istraživanja. Merne informacije najčešće imaju formu električnog signala. Razlog je što su pojačanje, obrada, prenos i očitavanje električnog signala usavršeni, a istovremeno se postiže visok metrološki kvalitet statičkih i dinamičkih karakteristika. Merenje mehaničkih, hemijskih, biloških i procesnih veličina provodi se pomoću raznih davača, transdjusera, transmitera i mernih pretvarača. Za njih se u novije vreme ustalio termin senzor, što je koincidiralo sa razvojem materijala i tehnologija, integracijom komponenti i primenom mikromehanike i mikroelektronike.

Senzor je, dakle, uređaj koji pretvara merenu fizičku veličinu uglavnom u električni signal, odlikuje se malim dimenzijama, izuzetnim tehničkim karakteristikama i sposobnošću obrade signala. Navedena definicija unosi pomak u terminološko značenje pojma senzor, koji prema klasičnom tumačenju predstavlja samo primarni osetilni element u nizu pretvaranja merene fizičke veličine u merni signal. Moderno shvatanje senzora do punog izražaja dolazi upravo u robotici.

Senzori i roboti. Da bi robot sa jednostavnim pokretima mogao da izvodi složene operacije u promenljivoj okolini, neophodno je da ima određeni stepen inteligencije. Pod tim se podrazumeva da je u stanju da interpretira informacije o varijacijama u položaju radnih predmeta i o promenama u okolini i da im prilagodi svoje delovanje bez intervencije operatora. Na taj način robot proširuje autonomiju i povećava preciznost manipulativnih operacija.

Informacije se dobijaju pomoću senzora koji se ugrađuju na manipulator ili njegovu periferiju. Neposredan zadatak je da se omogućí hvataljci da bez obzira na redosled i položaj radnih predmeta u radnoj oblasti izvrši potrebnu manipulaciju nad tačno određenim predmetom. Sistem automatskog upravljanja obrađuje informacije sa senzora i pomera hvataljku, pri čemu se automatski kompenzuju efekti savitljivosti manipulatora i toleransi mehaničke konstrukcije robota. Za uspešan rad robotu su potrebne kompleksne informacije o objektu: položaj, orijentacija, veličina, hrapavost, boja, temperatura, sila/moment i dr. Izdvajanje kompleksne informacije iz mernih signala sa senzora provodi se primenom biokibernetskih principa, tj. na sličan način kao kod čoveka, pa se govori o veštačkoj ili senzorskoj percepciji.

U tom smislu svi roboti pripadaju jednoj od tri generacije. Prvoj generaciji pripadaju programski roboti koji ciklično ponavljaju zadati program, uvek na isti način i u istim radnim uslovima. Pogodni su za uzimanje predmeta sa trake, za obavljanje pomoćnih operacija kod alatnih mašina, kod presovanja, zavarivanja i sl. S obzirom da se ovi zadaci svode na tačno pozicioniranje, roboti prve generacije opremljeni su jedino senzorima unutrašnjih informacija, tj. informacija o položaju samog robota. Zbog toga su ovi roboti nefleksibilni u pogledu promene zadatka, ali su jednostavni i relativno jeftini, te je zato većina industrijskih robota ovog tipa.

Adaptivni roboti pripadaju drugoj generaciji. Pored senzora unutrašnjih informacija oni su opremljeni i sensorima spoljašnjih informacija koje se odnose na prostor i predmete u radnom okruženju robota. Zahvaljujući tome adaptivni robot može da se u većoj ili manjoj meri orijentiše u prostoru i da se prilagodi novim situacijama koje se javljaju pri obilaženju prepreka, šavnom zavarivanju, bojenju, uzimanju predmeta sa trake koji su proizvoljno raspoređeni i orijentisani i dr. Osnovna karakteristika adaptivnih robota je da imaju definisan zadatak, ali mogu da menjaju svoje kretanje pri njegovom ostvarivanju.

Inteligentni roboti pripadaju trećoj generaciji. Njihova je osobina da u neizvesnim situacijama mogu da odlučuju i generišu neprogramirane pokrete zahvaljujući obradi kompleksnih informacija dobijenih pomoću senzora koji su i sami složeni. Prepoznavanje situacije i prilagođavanje promenljivoj okolini baziraju se na elementima veštačke inteligencije. Veći stepen inteligencije podrazumeva veću sposobnost prilagođavanja.

Treba napomenuti da tri navedene generacije robota ne smenjaju jedna drugu već postoje uporedo i primenjuju se u skladu sa zahtevima konkretnog zadatka.

Senzorske funkcije. Informacije sa senzora neophodne su pre, za vreme i posle izvršenja radnog zadatka. Pre izvršenja zadatka, na primer, delovi mogu da se transportuju do robota i ostavljaju na određenom mestu. Robot mora da zna kada da preuzme deo, odnosno kada da započne izvršenje zadatka. Ovo se može jednostavno rešiti postavljanjem infracrvenog ili optoelektronskog senzora koji će detektovati prisustvo i poziciju objekta u radnom prostoru i tu informaciju proslediti do kontrolera. U toku izvršenja radnog zadatka robot pomoću hvataljke ili vakuumske sisaljke drži objekat i prenosi ga na drugo mesto radi dalje obrade. Bez obzira koji tip šake ili alata je upotrebljen, moraju se ugraditi senzori koji „osećaju“ ili „vide“ šta se dešava na objektu, tj. detektuju njegovo prisustvo, poziciju, oblik, defekte i dr. Kada se radni zadatak obavi, objekat se transportuje na sledeću etapu obrade ili se odstranjuje kao defektan. Senzori ovde treba da daju informaciju da je hvataljka slobodna, gde je trenutno pozicionirana i koliki je broj ispravnih/neispravnih delova.

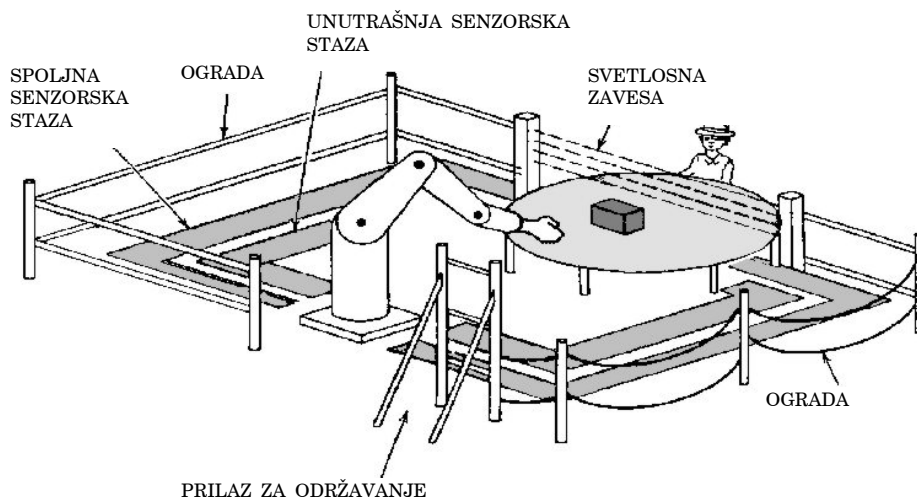
Iz ove jednostavne analize zaključuje se da je generisanje informacije pomoću senzora u uskoj vezi sa funkcijom koju obavljaju. Razlikuju se sledeće senzorske funkcije:

- *Detekcija prisustva* objekta u radnom prostoru. Senzori sa ovom jednostavnom funkcijom imaju izlazni signal tipa on/off i obično su na svakom robotu najviše zastupljeni u poređenju sa svim drugim sensorima.
- *Lociranje*, tj. određivanje pozicije objekta. Ova senzorska funkcija je složenija od prethodne, jer osim prisustva objekta senzor treba da sa određenom metrološkom tačnošću utvrdi gde se objekat nalazi.
- *Inspekcija* je senzorska funkcija koja osim detekcije prisustva i određivanja lokacije uključuje i verifikaciju karakteristika objekta kao što su orijentacija, oblik, veličina ili boja. Za ovakvu funkciju služe senzori koji mogu da generišu određenu sliku (viziju) objekta. Takvi senzori imaju bazu podataka o karakteristikama objekta. Baza se formira u fazi obučavanja senzora i dopunjava se kasnije samostalnim učenjem pomoću posebnih softverskih programa. Ovi senzori nazivaju se inteligentnim, a primenjuju se u kontroli proizvoda na traci.
- *Identifikacija* je najsloženija senzorska funkcija. Realizuje se istim tipom senzora kao i inspekcija, ali je smisao da se određeni objekat sledi tokom čitavog procesa obrade, a ne samo unutar jedne faze kao kod inspekcije. Tipičan slučaj je praćenje delova počev od sortiranja i zatim na svim etapama asembliranja kako bi se nad tim delovima na svakoj etapi obavila potrebna operacija.
- *Monitoring i predikcija* radnih uslova podrazumevaju detekciju stanja okoline, performansi robota i svih sistema koji su na njemu ugrađeni radi zaštite od otkaza. Ako se ustanovi da neki deo sistema ne sme otkazati u toku radne operacije jer bi to dovelo do isključivanja cele proizvodne linije, celishodno je da se zamena tog dela obavi što kasnije, ali pre kritičnog trenutka. Zato se taj deo mora nadzirati da se na vreme ustanove elementi ranog upozorenja otkaza. Na primer, za bušilicu je kritični deo burgija. Jednostavan senzor bi mogao samo da indicira da je burgija slomljena, ali s obzirom na postavljeni cilj ovde je bolje ugraditi senzor preopterećenja burgije: senzor struje u motoru, senzor temperature ili senzor zvuka. Kada se informacije sa senzora prepoznaju kao nastupanje otkaza, preduzima se zaštitna akcija: uspostavlja se bezbedan način rada i zamena burgije. Ovo je tzv. prediktivno održavanje koje je složenije od

preventivnog i običnog održavanja. Senzori sa funkcijom monitoringa i predikcije stanja sistema spadaju u inteligentne senzore.

- *Sigurnost i zaštita.* Senzori sa ovom funkcijom namenjeni su za zaštitu ljudi i okoline od robota. Robot kao višenamenska mašina može da izvodi brze i neočekivane pokrete i da razvija punu snagu u bilo kojoj tački radne oblasti, koja je mnogo veća u odnosu na osnovu robota. Da se spreče povrede ljudi i okoline neophodni su senzori sa funkcijom sigurnosti i zaštite (slika 1.5). Posebni programi za bezbednost analiziraju informacije sa ovih senzora, ali i sa svih ostalih – bez obzira na njihovu osnovnu funkciju, tako da upravljački sistem reaguje adekvatno opasnim situacijama koje nastaju zbog ulaska čoveka u radnu zonu ili zbog izletanja komada izvan te zone u okolinu.

Treba napomenuti da se nazivi senzorskih funkcija podudaraju sa istoimenim robotskim funkcijama. Za realizaciju određene funkcije robotu su potrebni odgovarajući senzori. Na primer, robotu su za inspekciju neophodni senzori za detekciju prisustva, senzori za detekciju lokacije i orijentacije, te senzori za inspekciju.



Slika 1.5. Zaštita radne okoline robota

Povezivanje između robota i senzora omogućava komunikaciju robota sa okolinom, praćenje radnih funkcija i stanje

sistema instaliranih na robotu. Informacije sa senzora imaju analogni ili digitalni oblik.

Primarnu obradu (pretprocesiranje) informacija obavlja lokalni kontroler, a završnu obradu kontroler robota, koji donosi odluke šta treba da se radi, preduzima akcije u saglasnosti s odlukama i nadgleda provođenje akcija. Na primer, iz informacije o poziciji radnog komada kontroler formira upravljački signal za pokretanje manipulatora u željenu poziciju i signal za šaku/alat za izvršenje radnog zadatka, a na osnovu daljih informacija prati realizaciju zadatka. Da bi se postigla željena brzina i efikasnost rada, kontroler se projektuje za specifične namene.

Tipični kontroler je mikroračunar sa arhitekturom koju čine: mikroprocesor (centralna procesna jedinica – CPU), memorija, ulazno–izlazni moduli (I/O) i spoljne magistrale za električno povezivanje. Program smešten u memoriji izvršava se zahvaljujući interakciji CPU i I/O putem magistrale adresa, magistrale podataka i upravljačke magistrale. Promenom programa isti kontroler može se upotrebiti za različite aplikacije.

Kada je broj senzora i izvršnih uređaja veliki, kontroler robota, i pored velike brzine rada koju mu omogućava mikroprocesorski bazirana CPU, ne može da stigne da obradi sve informacije, pa se tada dodaje eksterni kontroler za pretprocesiranje. Eksterni kontroler može u celosti biti smešten na jednoj ploči. Zbog male cene ovaj tip kontrolera mnogo se upotrebljava u različitim oblastima tehnike. Nedostaci su mu ograničen broj periferala koje kontroliše i otežano programiranje u višim programskim jezicima. U novije vreme ovi nedostaci sve su manje izraženi. Eksterni kontroler može biti izgrađen na bazi PC računara, čije su osnovne prednosti u povećanoj memoriji, u mogućnosti povezivanja sa raznovrsnim periferalima i u raspoloživom softveru. Najčešće PC služi za nadgledanje rada više kontrolera izgrađenih na jednoj ploči, za veće i složenije obrade podataka, za grafički displej i dr.

Treći tip robotskog kontrolera označava se kao programabilni logički kontroler (PLC). Tipični PLC prima diskretne senzorske informacije i direktno daje odgovarajuće upravljačke izlaze generisane primenom logičkih operacija. Prvi PLC kontroleri napravljeni su da zamene releje. Zato je u njima tradicionalno zastupljena sekvencijalna logika, koja je danas proširena matematičkim funkcijama. Nedostatak PLC je teže programiranje u odnosu na prethodna dva tipa robotskih kontrolera.

Povezivanje robotskog kontrolera sa sensorima i drugim perifericalima ostvaruje se pomoću ulazno–izlaznih modula. Najčešće su to kontroleri kojima upravlja robotski kontroler, a između njih su linije za prenos digitalnih signala ili standardni komunikacioni interfejs (RS–232C, RS–422 ili RS–488).

1.2.2. Podela senzora u robotici

Klasifikacija senzora u robotici može se ostvariti prema različitim kriterijima. Podela na kontaktne i beskontaktne senzore jedna je od najranijih – održala se i do danas. Najpotpunija podela temelji se na kompleksnosti senzorske informacije, na osnovu čega se razlikuju tri osnovne grupe senzora:

- proksimiti senzori;
- merni senzori;
- senzori vizije: taktilne, zvučne, termičke i optičke.

Senzori blizine imaju informacioni kapacitet od jednog bita jer je njihov izlazni signal dvonivoski. Vrednost izlaza zavisi od toga da li je udaljenost radnog predmeta manja ili veća od zadane. Proksimiti senzori i pored jednostavnosti imaju veliku primenu u kontroli referentnih faza manipulativnih procesa.

Merni senzori imaju električni izlazni signal koji je u stacionarnom stanju proporcionalan merenoj fizičkoj veličini. Odlikuju se visokim metrološkim pokazateljima. Najčešće se prave kao otpornički, kapacitivni, elektromagnetski, pizeoelektrični ili optoelektronski. U robotici služe za merenje:

- geometrijsko–prostornih koordinata (udaljenost radnih predmeta od manipulatora, međusobna udaljenost predmeta, pozicija predmeta u radnoj oblasti, relativni položaj segmenata manipulatora, veličina predmeta);
- kinematskih veličina (translatorna i ugaona brzina, ubrzanje);
- sile (sila, moment i pritisak između dva robota, masa radnog predmeta, kontaktna sila između hvataljke i radnog predmeta);
- ostalih veličina (termička, električna, magnetska ili optička svojstva predmeta).

Senzori slike daju informaciju u obliku slike koja se odnosi na strukturu, oblik ili topologiju radnih predmeta. Za takvu informaciju tačnost ima manji značaj nego kod mernih senzora, ali je kompleksnost znatno veća. Slika se dobija kao projekcija trodimenzionalne scene na jednodimenzionalni niz ili dvodimenzionalnu matricu sastavljenih od n , odnosno $n \times n$ mernih senzora. Elektronskim skaniranjem niza/matrice nastaje serijski signal koji reprezentuje datu sliku. Skaniranje može biti i mehaničko, ali je ono mnogo sporije. Takvo skaniranje dobija se pomoću uređaja koji pomera senzorski niz ili senzorsku matricu, tako da se za jedan položaj dobija određeni segment slike.

Prema fizičkom principu na kojem se dobija slika, razlikuju se taktilna (dodirna), zvučna (ultrazvučna) i optička vizija. Termička vizija je specijalan slučaj taktilne kada postoji kontakt sa radnim predmetom i kada toplota sa predmeta na senzor prelazi kondukcijom, odnosno specijalan je slučaj optičke vizije kada se prelaz toplote od predmeta do senzora odvija radijacijom. Razvoj optičke vizije najdalje je odmakao u pogledu primene. Posebno je pogodna za beskontaktnu detekciju pozicije, orijentacije i oblika radnih predmeta, za analizu scene, za navigaciju pokretnih robota i za inspekciju proizvoda. Ultrazvučna vizija ima sličnu namenu kao i optička. U uslovima smanjene vidljivosti daje bolje rezultate od optičke, ali je od nje inferiornija zbog niže rezolucije i problema sa kontrolom ultrazvučnih signala. Taktilna vizija trenutno ima najmanju primenu, ali se od nje mnogo očekuje pošto pored detekcije pozicije, orijentacije i oblika omogućava praćenje karakteristika površine predmeta kao što su hrapavost ili tekstura.

LITERATURA

1. M.Popović, E.Humo: „Senzori budućnosti“, *Jurema*, 1987.
2. M. Popović: „Senzori i merenja“, Viša elektrotehnička škola, Beograd, 1994.
3. I.Plander: „Trends in the development of sensor systems and their use in some technological areas“, *Robotics*, No. 3 (157–165), 1987.
4. P.P.L.Regtien: „Sensors for applications in robotics“, *Sensor and Actuators*, Vol. 10, No. 3&4 (195–218), 1986.
5. K.Sugimoto: „Present state and trends in robot technology“, *Robotics*, Vol. 3, No. 1 (81–86), 1987.

6. P.P.L.Regtien: „Sensors systems for robot control“, *Sensors and Actuators A*, Vol. 17, Nos. 1&2 (91–101), 1989.
7. J.A.Gupton, Jr.: „*Computer-controlled industrial machines, processes and robots*“, Prentice–Hall, Englewood Clifffs, New Jersey, 1986.
8. V.Potkonjak: „*Savremeni roboti. Uvod u teoriju i primenu*“, Naučna knjiga, Beograd, 1986.
9. M.Vukobratović, D.Stokić, N.Kirćanski, D.Hristić, B.Karan, D.Vujić, M.Đurović: „*Uvod u robotiku*“, Institut „Mihajlo Pupin“, Beograd 1986.
10. R.A.Grupen, R.J.Popplestone: „Sensor-based automated manufacturing“, *Robotics Today*, Vol.1, No. 2 (1–5), 1988.
11. R.Dorf: „*International Robotics Encyclopedia*“, John Wiley & Sons, New York, 1988.
12. E.J.Kehoe: „Practical robot safety“, *Robotics Today*, 38–41, april 1985.

SENZORI BLIZINE

2.1. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE

Definicija. Senzori blizine imaju izlazni signal koji se menja kada je blizina objekta (*proximity*) veća ili manja od određene vrednosti. Zbog toga se često nazivaju relejnim sensorima odnosno prekidačima, čije ime zavisi od fizičkog principa na kome rade: induktivni, kapacitivni, optoelektronski i sl.

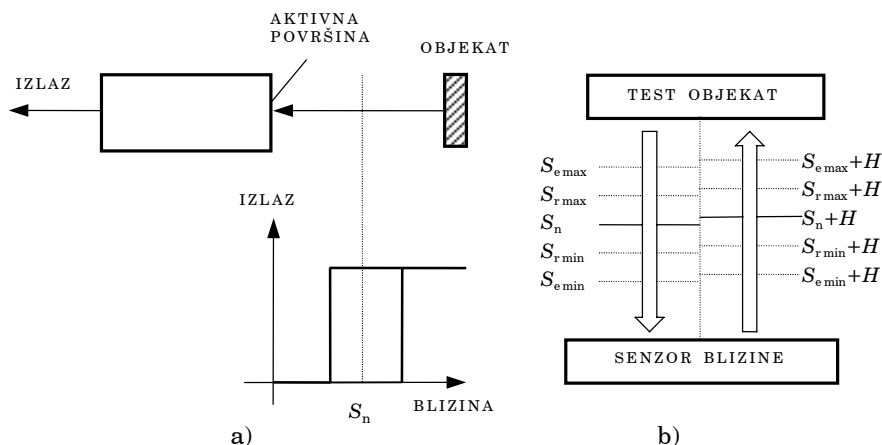
Senzori blizine su jeftini, jednostavni i izdržljivi. Njihov informacioni kapacitet od jednog bita je mali, ali i pored toga imaju važnu ulogu tokom izvršavanja automatskih procesa – zavisno od izlaznog signala proces počinje, završava, menja se ili prekida. U robotici se primenjuju pri registraciji (brojanju) radnih komada i pri detekciji prisustva objekata i prepreka. Odlikuju se visokim metrološkim i tehnološkim vrednostima. Terminologija, statičke i električne karakteristike, projektovanje, kablovski priključci, kućišta, primena u eksplozivno opasnim prostorima, ispitne i test procedure, propisani su evropskim standardima EN 50008 – EN 50044.

Parametri statičke karakteristike. Zbog načina na koji rade, senzori blizine imaju relejnu statičku karakteristiku sa histerezisom (slika 2.1.a). Senzorski deo spojen je na odgovarajuće elektronsko kolo čiji je izlaz zatvoren (NC, prema *normally closed*) ili otvoren (NO, prema *normally open*). Stanje NC često se označava sa ON (uključen) i pridružuje mu se logička jedinica, a stanje NO tada se označava sa OFF (isključen) i pridružuje mu se logička nula.

Preklopno rastojanje ili opseg delovanja je udaljenost pri kojoj se menja izlazni signal. Zbog varijacije u tehnološkim i konstrukcionim parametrima, uticaja temperature i nestabilnosti

napona napajanja, nominalna vrednost preklopnog rastojanja ima samo teorijski značaj. Za tehničku primenu relevantni su sledeći parametri (slika 2.1.b):

- *Realno preklopno rastojanje* S_r , koje se razlikuje od nominalnog za $\pm a_r S_n$. Koefficient a_r obuhvata proizvodne i konstrukcione toleranse definisane pri nominalnom naponu napajanja i radnoj temperaturi od 20°C i ima maksimalnu vrednost 0,1, tako da je $0,9S_n \leq 0,9S_r \leq 1,1S_n$;
- *Efektivno preklopno rastojanje* S_e koje se razlikuje od nominalnog za $\pm a_e S_n$. Koefficient a_e odražava uticaj temperature, a vrednost mu je takva da je $0,9S_r \leq S_e \leq 1,1S_r$, odnosno $0,81S_n \leq S_e \leq 1,21S_n$;
- *Operativno preklopno rastojanje* S_o , koje odgovara dozvoljenim uslovima rada, a definiše se kao $0 \leq S_o \leq S_{e\min}$, odnosno $0 \leq S_o \leq 0,81S_n$.



Slika 2.1. Statička karakteristika senzora blizine: a) relejna karakteristika, b) opseg delovanja

Histerezis statičke karakteristike definiše se kao nepodudarnost između preklopnog rastojanja kada se detektovani objekat približava senzoru i preklopnog rastojanja kada se objekat udaljava od senzora. Histerezis se izražava kao apsolutna vrednost ili u procentima nominalnog preklopnog rastojanja.

Ponovljivost statičke karakteristike predstavlja tačnost efektivnog preklopnog rastojanja S_e za dva sukcesivna prekidačka stanja između kojih je interval od osam sati, pri ambijentnoj

temperaturi $15^{\circ}\text{C} < t < 30^{\circ}\text{C}$ i pri napajanju koje varira najviše $\pm 5\%$ od nominalne vrednosti. Treba napomenuti da su u ponovljivost sumarno uključeni efekti promenljivih uslova sredine, histerezisa i drifta.

Frekvencija preključivanja f je maksimalni broj uklopnih ciklusa u jednoj sekundi pri određenim uslovima. Jedan uklopni ciklus definiše se kao odnos ON/OFF, uz primenu standardnog test objekta sa tačno propisanim oblikom, dimenzijama i materijalom od kojeg je napravljen. U zavisnosti od fizičkog principa rada senzora specificirani su odgovarajući test objekti i odnosi ON/OFF (1/1 ili 1/2).

Električne karakteristike. Napajanje senzora ostvaruje se dvožično preko pojačavača čiji se rad kontroliše potrošnjom, tj. strujom senzora. Za pojačavač se specificiraju sledeći parametri:

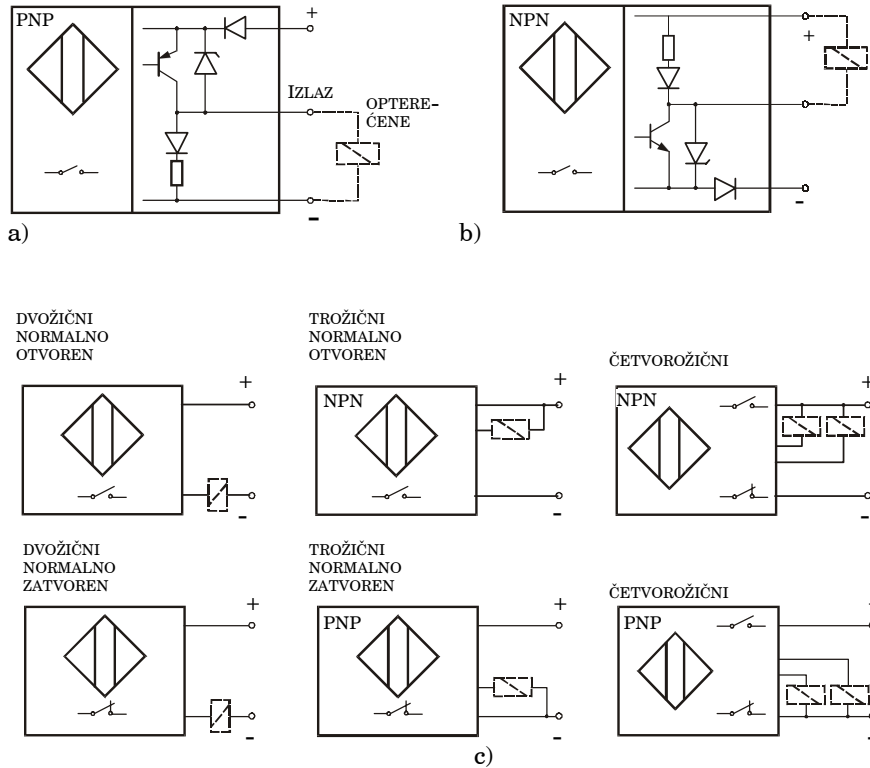
- napon napajanja U sa određenom vrednošću struje kratkog spoja I_{ks} ;
- vrednost struje I_{pr} kada je senzor u tački preklapanja;
- struja I_1 , koja indicira prekid napojnog voda ili otkaz senzora, pri čemu je vrednost I_1 manja od minimalne vrednosti radne struje u kolu;
- struja I_2 , koja označava kratak spoj u napojnom vodu ili otkaz senzora, pri čemu je vrednost I_2 veća od maksimalne vrednosti radne struje u kolu.

Izlazni stepen je *pnp* ili *nnp* tipa. U prvom slučaju opterećenje se priključuje između izlaza i negativnog pola napajanja (pozitivna logika), a u drugom slučaju između izlaza i pozitivnog pola (negativna logika), (slika 2.2.a,b).

Označavanje. Standardni senzori blizine imaju dvožični izlaz, koji je u normalnom stanju otvoren (NO) ili zatvoren (NC). Složenija električna kola omogućavaju da se za normalno stanje, u zavisnosti od konkretnih uslova primene, odabere NO ili NC. U tom slučaju na izlazu su tri priključka. Senzor sa četiri priključka omogućava istovremenu upotrebu stanja NO i NC (slika 2.2.c).

Ekonomski parametri. Velike mogućnosti u primeni i niska cena usloveli su da na promet senzora blizine otpada oko 17% svih senzora. Za ilustraciju može se navesti da je za 1994. u SAD predviđena njihova prodaja u iznosu od 165 miliona dolara,

pri čemu je ukupna vrednost tržišta senzora procenjena na jednu milijardu dolara.

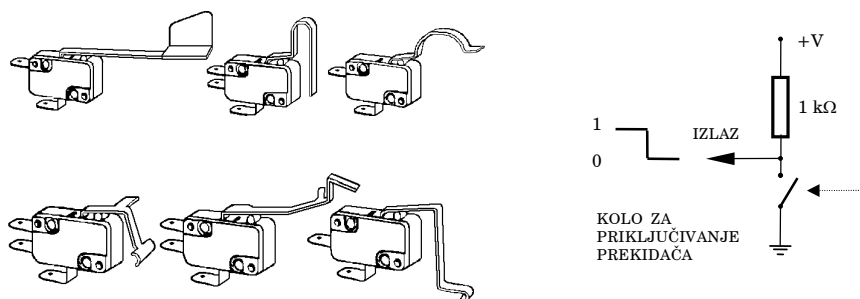


Slika 2.2. Izlaz senzora blizine a) pnp, b) npn, c) simboličko označavanje

2.2. ELEKTROMEĀANIČKI SENZORI

Elektromehanički mikroprekidači su najstariji senzori blizine (Honeywell Micro Switch, 1932). Mikroprekidač je ugrađen u kućištu, a kontakti se aktiviraju pomoću poluge koja ima raznovrsne oblike, zavisno od namene (slika 2.3.). Preključivanje električnih kontakata u određenoj poziciji realizuje se sa tačnošću do ± 2 mm,

radna temperatura je od $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+550\text{ }^{\circ}\text{C}$, frekvencija preključivanja 100–300 uklopnih ciklusa u minuti, a vek trajanja je ograničen na 10^6 – 10^7 preključivanja. Ovakvi prekidači su jeftini i mogu se direktno, bez pojačavača, upotrebiti za prekidanje jednosmerne i naizmenične struje do 25 A.



Slika 2.3. Elektromehanički prekidači

Rid-releji (*reed-switch*) sa mehaničkim kontaktima preteče su savremenih senzora blizine. Elastični kontakti rid-releja prave se od feromagnetskog materijala i hermetički su zatvoreni u kapsuli ispunjenoj inertnim gasom. Kontakti su u normalnom stanju otvoreni, a kada se približi stalni magnet pričvršćen na ruci robota ili radnom objektu, kontakti se zatvaraju. Dobre osobine senzora na bazi rid-releja su visoka pouzdanost od preko 10^7 prekidanja, tačnost i histerezis $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$, temperaturni opseg rada od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, neosetljivost na vlagu i mogućnost rada u eksplozivno opasnoj sredini. Loše osobine su preklap sa odskakanjem (treperenje kontakata) i relativno veliko vreme uspostavljanja novog stanja.

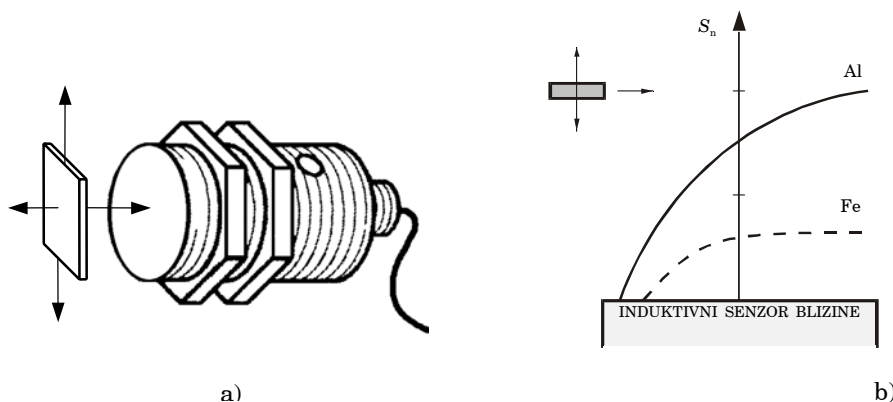
Elektronski senzori blizine nemaju nedostatke svojih preteča sa mehaničkim kontaktima, a zadržavaju sve njihove dobre osobine.

2.3. ELEKTROMAGNETSKI SENZORI BLIZINE

2.3.1. Induktivni senzori

Princip rada temelji se na zavisnosti induktivnosti kalema od promene magnetske otpornosti. Sa približavanjem metalnog predmeta slabi magnetska otpornost kalema i raste induktivnost. Kada se predmet udaljava, dešava se suprotna pojava. Parametri elektromagnetskog kola i karakteristike objekta određuju zonu detekcije.

Standardni test objekat za induktivni senzor blizine definisan je kao kvadratna čelična pločica (ČE 0300) debljine 1 mm sa stranicom čija je dužina jednaka prečniku aktivne površine cilindričnog senzora (slika 2.4.a). Pomeranjem test objekta u horizontalnom i vertikalnom pravcu senzor će se aktivirati kada prednja ivica objekta dođe u određenu tačku. Spajanjem ovih tačaka dobija se kriva odziva (slika 2.4.b).

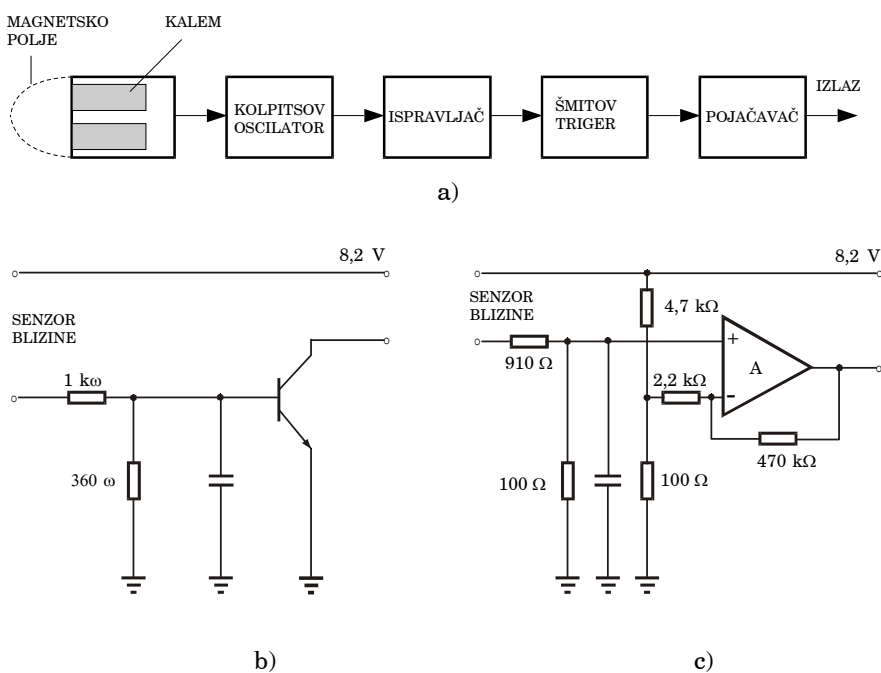


Slika 2.4. Testiranje induktivnog senzora: a) standardni test objekat, b) krive odziva za železo i aluminijum

Induktivni senzor blizine može se primeniti i za detekciju metalnih objekata koji nisu od čelika. Tada je potrebno korigovati nominalnu krivu odziva sa koeficijentom korekcije koji se deklariše u odnosu na nominalno preklopno rastojanje S_n . Na primer, za levano železo faktor korekcije je 1,1, za aluminijumsku foliju debljine 0,05 mm je 0,9, za nerđajući čelik 0,7, za mesing 0,4–0,5, za aluminijum 0,35–0,4 i za bakar 0,3–0,4. Kada je radni objekat veći

od test objekta, preklopno rastojanje jedva će se promeniti, ali kada je radni objekat manji ili tanji od test objekta, preklopno rastojanje jako se redukuje. Zato je podatak o dimenzijama test objekta bitan za pravilan izbor senzora.

Struktura. Induktivni senzor sa jednosmernim izlaznim signalom sastoji se od kalema kao primarnog osetilnog elementa, oscilatora koji generiše naizmenično elektromagnetsko polje, demodulatora koji pretvara promenu amplitude u jednosmerni signal, prekidačkog stepena (Šmitovog trigera) i pojačavača (slika 2.5.a).



Slika 2.5. Induktivni senzori blizine: a) blok-šema, b) tranzistorsko prekidačko kolo, c) prekidačko kolo sa operacionim pojačavačem

Čim se uključi napajanje, počinju oscilacije na rezonantnoj frekvenciji f . Zbog ovih oscilacija, u smeru ose senzora javlja se elektromagnetsko polje. Kada metalni objekat uđe u polje, na njegovoj površini indukuju se vihorne struje koje smanjuju energiju polja. Gubici energije zavise od parametara polja, geometrije i fizičkih osobina materijala od kojeg je napravljen objekat. Proračun

gubitaka zbog vihornih struja za objekat od lima debljine d provodi se pomoću formule

$$P_{vs} = \frac{\pi d f B_{\max}}{6 \rho 10^6} [\text{W/cm}^2], \quad (2.1)$$

gde su: ρ specifična električna otpornost lima, f frekvencija pobudnih oscilacija i B_{\max} amplituda magnetske indukcije. Zbog ovih gubitaka smanjuje se faktor dobrote kalema $Q = \omega L/R$. To je opterećenje na rad oscilatora i amplituda oscilacija opada. Sa približavanjem objekta redukcija amplitude sve je izrazitija i, na kraju, strujno kolo sasvim se prekida. Kolo trigeru menja stanje izlaznog pojačavača i senzor iz normalno zatvorenog (NC) prelazi u normalno otvoreno stanje (NO).

Električne karakteristike induktivnih senzora blizine propisane su standardima. Najvažniji parametri su:

- stabilan napon napajanja $U_o = 7-9$ V (preporučuje se 8,2 V) sa strujom kratkog spoja $I_{ks} = 7-16$ mA (preporučuje se 8,2 mA);
- struja $I_{pr} = 0,2-2,1$ mA kada je senzor u tački preklapanja;
- struja $I_1 = 0,05-0,15$ mA, koja indicira prekid napojnog voda ili otkaz senzora;
- struja $I_2 = 6,5-7,45$ mA, koja indicira kratak spoj u napojnom vodu ili otkaz senzora, pri čemu navedenom opsegu struje odgovara ekvivalentna otpornost senzora od 360Ω do 100Ω i za napon napajanja 8,2 V.

Radna vrednost struje zavisi od samog senzora i određuje se u skladu sa prethodnim tehničkim parametrima. Za kontrolu rada pojačavača unutar definisanih granica upotrebljavaju se diskretna kola – tranzistorska ili sa operacionim pojačavačem (slika 2.5.b,c).

Matematički modeli induktivnih senzora blizine opisuju zavisnost induktivnosti L od udaljenosti objekta D . Pri gradnji matematičkog modela $L(D)$ potrebno je odrediti uslove funkcionisanja, koordinatni sistem, aproksimaciju modela i parametre modela.

Uslovi koji određuju funkcionisanje senzora su:

- induktivnost L_0 pri potpunom kontaktu senzora i objekta za $D=0$:

$$L_0 = L(0) ; \quad (2.2)$$

- induktivnost L_{INF} kada je objekat daleko od senzora, tj. za $D \rightarrow \infty$:

$$L_{\text{INF}} = L(\infty) ; \quad (2.3)$$

- monotona promena $L(D)$ u intervalu $D \in [0, \infty]$;
- osetljivost, odnosno konačna vrednost prvog izvoda:

$$S_0 = (dL/dD)_{D=0}. \quad (2.4)$$

Treba napomenuti da su navoji kalema smešteni u kućištu, pa objekat nikad neće u potpunosti zatvoriti magnetsko kolo, te će L_0 i S_0 uvek imati neke konačne vrednosti.

Koordinatni sistem u kome se gradi matematički model je najčešće pravougli, pri čemu se varijable predstavljaju u relativnom obliku radi jednostavnijeg poređenja karakteristika dvaju različitih senzora. Ove varijable su:

- relativno rastojanje d i definiše se u odnosu na karakterističnu geometrijsku dimenziju senzora D_{REF} :

$$d = D / D_{\text{REF}} ; \quad (2.5)$$

- realativna induktivnost:

$$\mathcal{L} = \frac{L - L_{\text{INF}}}{L_{\text{INF}}} = \frac{L}{L_{\text{INF}}} - 1. \quad (2.6)$$

Aproksimacija modela. Zavisnost $L(D)$, odnosno $\mathcal{L}(d)$, je hiperbolna funkcija koja se aproksimira kao eksponencijalna funkcija sa dva, tri ili četiri nezavisna parametra. U praksi se najčešće upotrebljava funkcija sa tri parametra:

$$\mathcal{L} = A \cdot e^{B \cdot d^C}, \text{ za: } A < 0, B < 0 \text{ i } 0 < C < 1, \quad (2.7)$$

pri čemu su:

$$\mathcal{L}_0 = \mathcal{L}(0) = A \quad \text{i}$$

$$S_0 = (d\mathcal{L}/dd)_{d \rightarrow 0} = \left(B \cdot C \cdot \mathcal{L} \cdot d^{C-1} \right)_{d \rightarrow 0} = -\infty. \quad (2.8)$$

Parametri modela. Ako je konačni model u obliku eksponencijalne funkcije (2.7), potrebno je odrediti parametre A , B i C pomoću poznatih vrednosti L_0 , L_1 , $L_{1/e}$, L_{INF} i D_{REF} :

- Za $d=1$, tj. za $D=D_{\text{REF}}$, iz jednačine (2.7) dobija se da je

$$\mathcal{L}(1) = \mathcal{L}_1 = A \cdot e^B, \quad (2.9)$$

odakle se lako nalazi relacija za računanje parametra B :

$$B = \ln \frac{\mathcal{L}_1}{A} = \ln \frac{\mathcal{L}_1}{\mathcal{L}_0} = \ln \frac{\frac{\mathcal{L}_1}{L_{\text{INF}}} - 1}{\frac{\mathcal{L}_0}{L_{\text{INF}}} - 1} = \ln \frac{L_1 - L_{\text{INF}}}{L_0 - L_{\text{INF}}}. \quad (2.10)$$

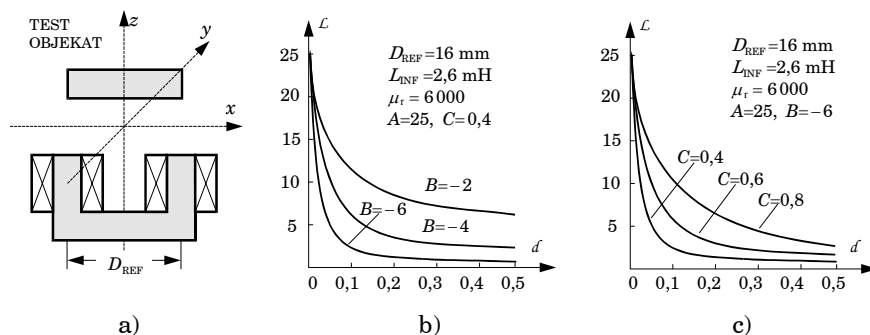
- Za određivanje parametra C može se uzeti bilo koja vrednost, ali je najpogodnija $d=1/e$, tj. $D=D_{\text{REF}}/e$, za koju jednačina (2.7) ima oblik:

$$\mathcal{L}_{1/e} = \mathcal{L}\left(\frac{1}{e}\right) = A \cdot e^{B \cdot e^{-C}} \quad (2.11)$$

odakle se, posle logaritmovanja, dobija parametar C :

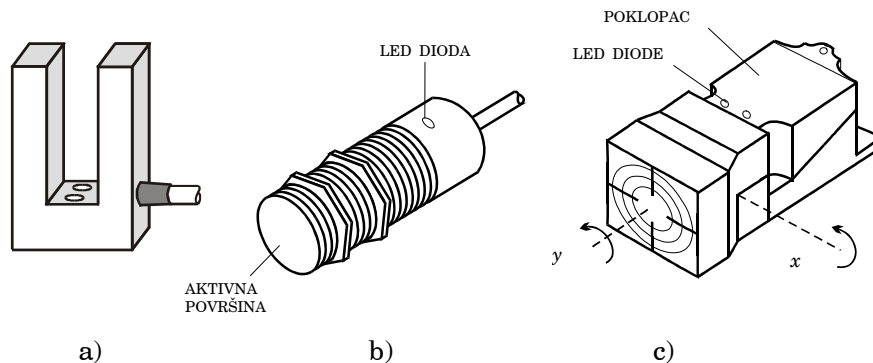
$$C = -\ln \frac{\ln \frac{\mathcal{L}_{1/e}}{\mathcal{L}_0}}{B} = \ln \frac{\ln \frac{\mathcal{L}_1}{\mathcal{L}_0}}{\ln \frac{\mathcal{L}_{1/e}}{\mathcal{L}_0}} = \ln \frac{\ln \frac{L_1 - L_{\text{INF}}}{L_0 - L_{\text{INF}}}}{\ln \frac{L_{1/e} - L_{\text{INF}}}{L_0 - L_{\text{INF}}}}. \quad (2.12)$$

Na slici 2.6 prikazan je induktivni senzor blizine U-tipa i uticaj parametara B i C na oblik statičke karakteristike modelirane funkcijom (2.7). Referentna udaljenost objekta D_{REF} za ovaj tip senzora definisana je kao rastojanje između osa polova jezgra. Najpovoljnije je da se radna tačka (preklopno rastojanje) induktivnog senzora odabere u oblasti visoke osetljivosti, ali je tada objekat suviše blizu i postoji rizik od mehaničkog oštećenja. Zato se u praksi preklopno rastojanje određuje za $d > 0,05$.



Slika 2.6. Analiza induktivnog senzora U-tipa: a) konstrukcija, b) uticaj parametra B na izgled krive $L=L(d)$, c) uticaj parametra C na izgled krive $L(d)$

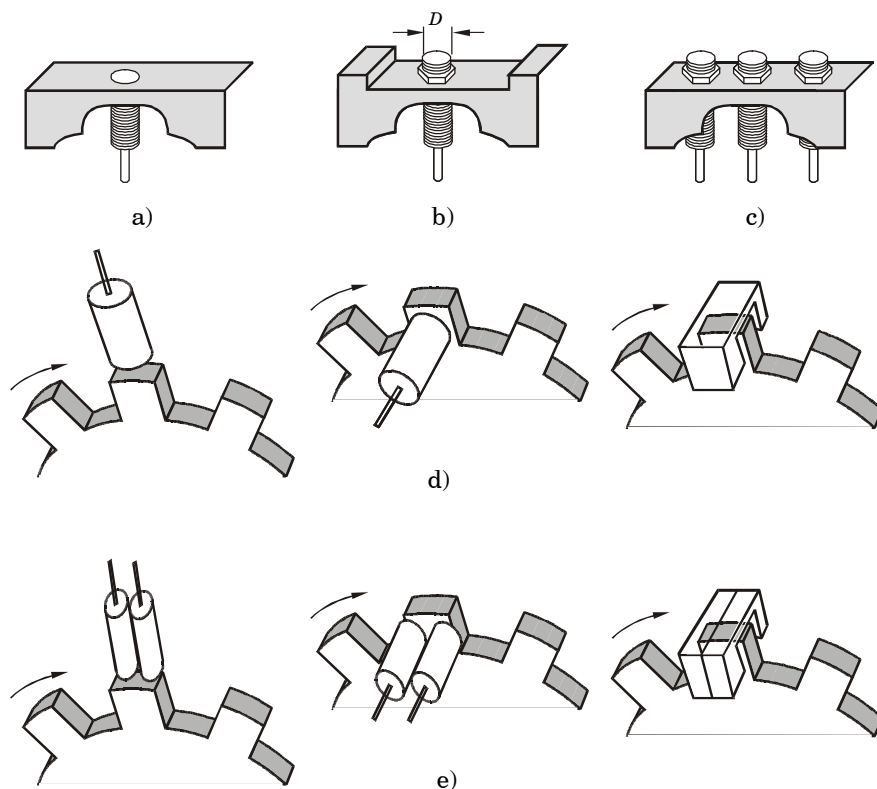
Način gradnje. Induktivni senzori blizine imaju U, cilindrični ili prizmatični oblik (slika 2.7). Kućište je napravljeno od nerđajućeg čelika ili od polimera. Često su na kućištu ili konektoru ugrađene LED diode za vizuelnu indikaciju stanja ON/OFF i ispravnosti napajanja. Kod prizmatičnog senzora obično postoji mogućnost da se čeonu površina kalema zakrene za 90° , čime se olakšava ugradnja i na manje dostupnim mestima.



Slika 2.7. Konstrukcija induktivnih senzora blizine: a) U-tip, b) cilindrični, c) prizmatični

Montaža i primena. Induktivni senzori blizine lako se ugrađuju. Od konkretne primene zavisi koji će se tip senzora odabrati i na koji će se način ugraditi. Ako metal noseće konstrukcije ne deluje na induktivnost, tada je najjednostavnija direktna ugradnja kao na slici 2.8.a. Da bi se izbegli uticaji

armature na induktivnost, senzor se može ugraditi na udubljenju, pri čemu je ivica armature udaljena od aktivne površine za neki iznos ustanovljen eksperimentom (slika 2.8.b).



Slika 2.8. Ugradnja induktivnih senzora blizine: a) direktna ugradnja, b) ugradnja u udubljenju, c) ugradnja u nizu, d) detekcija ugaone brzine, e) detekcija ugaone brzine i smera vrtnje

Više senzora istog tipa moguće je ugraditi u nizu – jedan do drugog. Tada je važno da se održi minimalno dozvoljeno rastojanje između aktivnih površina (1D–3D) kako ne bi došlo do uzajamnog delovanja (slika 2.8.c). Induktivni senzori obično se ugrađuju na nepokretnom delu armature, ali zahvaljujući savitljivim i lako izmenljivim priključnim kablovima jednostavna je ugradnja i na pokretnim delovima, na primer, na ruci robota.

Induktivni senzori blizine često se upotrebljavaju za detekciju brzine vrtnje osovine. Na osovinu se tada postavljaju nazubljeni

diskovi od feromagnetskog materijala. Prekidač se montira radijalno ili aksijalno u odnosu na disk, odnosno tako da zupci prolaze kroz procep senzora (slika 2.8.d). Za detekciju smera vrtnje potrebna su dva senzora, koji su montirani jedan do drugog tako da su njihovi izlazni signali fazno pomereni za 90° (slika 2.8.e). Stanja ovakvog para menjaju se po redosledu 00, 01, 11 i 10 za direktni smer vrtnje, odnosno obrnuto za reverzibilni smer vrtnje.

Tehničke karakteristike. Induktivni senzori blizine odlikuju se velikom pouzdanošću, kompaktnom gradnjom i otpornošću na hemikalije, mehaničke vibracije i vlažnost. Imaju značajne prednosti u odnosu na elektromehaničke: beskontaktni preklap bez treperenja, mala potrošnja, teorijski neograničen vek trajanja, zaštita od preopterećenja, zaštita od kratkog spoja i zaštita od nepravilnog priključivanja. Radna temperatura je u opsegu -25°C do $+80^\circ\text{C}$, a za specijalne konstrukcije opseg je veći: od -40°C do $+100^\circ\text{C}$. Frekvencija preključivanja veća je kod senzora manjih dimenzija jer oni imaju manju aktivnu površinu i manji opseg delovanja: na primer, $f=50-2500$ Hz za aktivnu površinu sa prečnikom $D < 1$ mm i preklapnim rastojanjem $S_n=1-2$ mm.

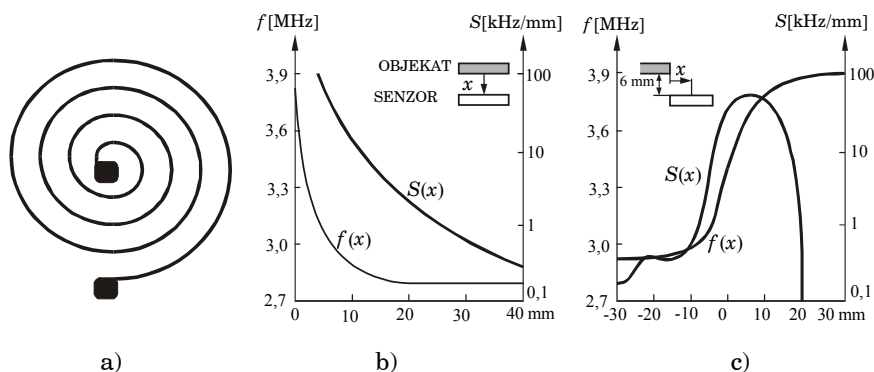
Za U-tip senzora nominalni opseg delovanja je 2–30 mm, preklapna tačka je u procepu na 60% dubine, histerezis je 5–10% nominalnog opsega, radni napon je 10–30 V, nominalni napon na izlazu je 8 V, a frekvencija preključivanja je 25–5000 Hz. Za cilindrični i prizmatični tip karakteristični su sledeći podaci: prečnik (dužina strane) aktivne površine 20–100 mm, nominalni opseg delovanja je 0,8–25 mm, operativni opseg je $0 < S_o < 0,8 S_n$, histerezis je $\pm 5\%$ a ostali podaci su slični kao i kod U-tipa. Napajanje je naizmenično 220 V, pri čemu je u jednosmernim kolima napon 10–30 V sa naizmeničnom komponentom (*ripple*) $\pm 10\%$ od te vrednosti.

2.3.2. Specijalni elektromagnetski senzori

Specijalni senzori napravljeni su da izdrže veliki dinamički pritisak od nekoliko stotina bara, da rade u eksplozivno opasnom prostoru, da se postavljaju u sigurno stanje u slučaju otkaza i dr. U klasi elektromagnetskih za ove namene postoje novi tipovi senzora blizine: tankoslojni, Holovi i magnetootpornički.

Tankoslojni induktivni. Specijalni tip induktivnog senzora blizine na bazi vihornih struja izgrađen je tehnikom tankog sloja. Tankoslojni spiralni navoji naneti su sa obadve strane podloge (slika 2.9.a). Geometrijski i električni pokazatelji takvog kalema su: debljina bakarnog sloja $35\ \mu\text{m}$, debljina podloge $1,6\ \mu\text{m}$, vanjski prečnik spirale $35\ \text{mm}$, unutrašnji prečnik $9\ \text{mm}$, broj obilazaka spirale 11, otpornost navoja $0,8\ \Omega$ induktivnost $10\ \text{mH}$. Tankoslojni kalem priključen je na Kolpitsov sinusni LC-oscilator sa frekvencijom $f_0=2-3\ \text{MHz}$. Kada se objekat od feromagnetskog materijala približava senzoru, smanjuje se magnetska otpornost kola, odnosno povećavaju se induktivnost i frekvencija (slika 2.9.b,c). Vihorne struje koje se indukuju u feromagnetskom objektu ograničavaju taj porast. Kada je objekat napravljen od neferomagnetskog materijala, tada na promenu frekvencije utiču samo vihorne struje.

Tankoslojni senzori blizine lako se ugrađuju u niz ili matricu, što se praktikuje kod detekcije oblika, lokacije i orijentacije većih metalnih objekata. U tom slučaju senzorska matrica postavlja se ispod ploče od pleksiglasa debljine $6\ \text{mm}$ da bi vertikalno rastojanje između niza i objekta bilo konstantno.



Slika 2.9. Tankoslojni induktivni senzor blizine: a) izgled, b) statička karakteristika $f(x)$ i osetljivost $S(x)$ pri čeonom približavanju objekta, c) statička karakteristika i osetljivost pri bočnom približavanju objekta

Senzori na bazi Hologov efekta. Holog efekt poznat je od 1879. godine, a njegova praktična primena postaje sve izrazitija zahvaljujući postojanju odgovarajućih poluprovodničkih materijala. Holog efekt nastaje kada se poluprovodnik kroz koji teče jednosmerna struja I unese u magnetsko polje indukcije B , pri čemu je struja poprečna na polje (slika 2.10.a). Tada dolazi do defleksije toka

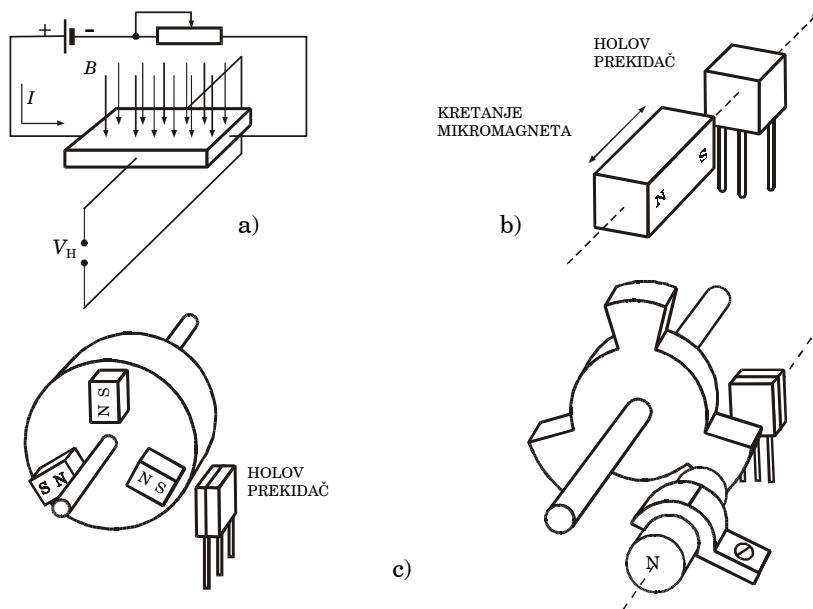
nosilaca naelektrisanja jer na svako naelektrisanje q deluje Lorencova sila

$$\vec{F} = q(\vec{V} \times \vec{B}), \quad (2.13)$$

pa se nosioci sa pozitivnim naelektrisanjem ($q > 0$) sakupljaju na jednoj površini poluprovodničke pločice, a nosioci sa negativnim naelektrisanjem ($q < 0$) na suprotnoj površini. Kao kumulativni rezultat između ovih površina nastaje Holov napon

$$V_H = kIB/d, \quad (2.14)$$

gde su: d debljina pločice, k Holova konstanta, koja zavisi od karakteristika poluprovodnika i temperature. Tipična vrednost Holovog napona je nekoliko mV, a vrednost izlazne otpornosti od nekoliko oma do nekoliko stotina oma. Treba napomenuti da je porast Holovog napona pomoću povećanja struje I ili smanjivanja debljine d ograničen zbog zagrevanja pločice.



Slika 2.10. Senzor blizine na bazi Holovog efekta: a) Holov efekt, b) senzor, c) detekcija ugaone brzine

Senzori blizine na bazi Holovog efekta primenjuju se u robotici tako da se stalni mikromagnet pričvrsti na radni objekat. Kretanje objekta može biti translatorno ili rotaciono (slika 2.10.b). Kada

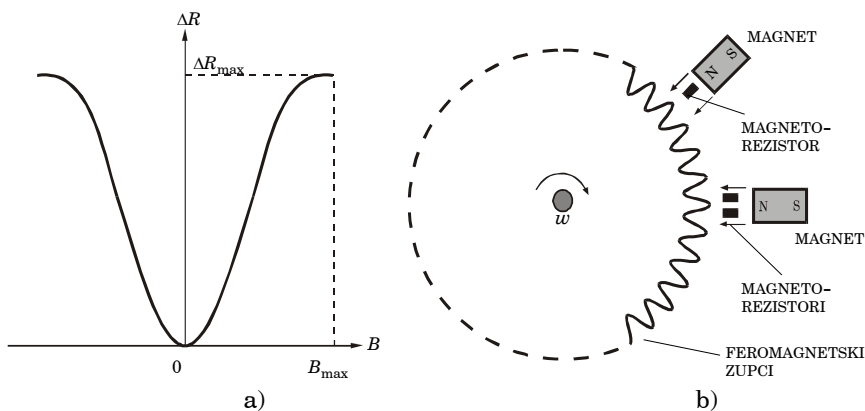
magnetski fluks definisanog smera zbog približavanja magneta dostigne određenu vrednost, na izlazu se generiše Holov napon. Udaljavanjem magneta, izlazni napon postaje jednak nuli. Kako je Holov napon malog nivoa, on najčešće služi kao upravljački napon za tranzistor koji se nalazi u istom kućištu. Tranzistor radi u prekidačkom režimu, tako da se na izlazu dobije napon potrebnog nivoa. Senzor je obično napravljen tako da približavanje južog pola magneta menja stanje tranzistora, dok približavanje severnog pola nema nikakvog značaja.

Senzori blizine na bazi Holovog efekta primenjuju se i za merenje ugaonog položaja i ugaone brzine. Na slici 2.10.c prikazane su dve praktične realizacije za merenje ugaone brzine. U prvom slučaju na rotirajućem disku smešteni su mikromagneti, a u drugom slučaju disk ima izgled propelera. Prolaskom magneta pored feromagnetnih krakova dobija se niz pravouglanih impulsa, čija je frekvencija proporcionalna merenoj brzini. Posebno su interesantni diskovi koji po obodu imaju veliki broj magneta, tako da se dobija tzv. prstenasti magnet.

Magnetorezistorski senzor menja svoju otpornost R u zavisnosti od magnetskog polja (slika 2.11.a). Magnetsko polje indukcije B_{\max} koje dovodi do zasićenja u promeni otpornosti, maksimalna promena otpornosti ΔR_{\max} , vrednost otpornosti R_0 pri $B=0$ i osetljivost $\Delta R/\Delta B$ projektuju se pogodnim izborom materijala i geometrije senzora u skladu sa konkretnom primenom. Obično kroz magnetorezistor prolazi konstantna struja I , a promena magnetskog polja izazvanog približavanjem objekta na kome je pričvršćen stalni magnet detektuje se kao promena napona na krajevima magnetorezistora.

Magnetorezistorski senzor je pogodan za merenje pozicije brzine objekata. Slika 2.11.b prikazuje detektor ugaone pozicije, odnosno brzine. Nailaskom zubaca od feromagnetnog materijala menja se magnetsko polje u kome se nalazi senzor, tako da se na izlazu dobija odgovarajući naponski impuls. Konstrukcija sa dva magnetorezistora na rastojanju od 1/2 širine zupca omogućava da se odredi smer kretanja. Tipični podaci koji se odnose na magnetorezistore su: dužina 2–2,5 mm, nominalna otpornost 180 Ω , 400 Ω ili 500 Ω , magnetska indukcija pri kojoj dolazi do zasićenja u promeni otpornosti $B=0,8-2$ T, nominalna struja 5 mA i frekventni opseg 0–5 MHz. Minimalno rastojanje feromagnetnih zubaca je

0,05 mm, tipična tačnost $\pm 1-2\%$, a uticaj temperature je do $\pm 1\%R_{\text{nom}}/^{\circ}\text{C}$.



Slika 2.11. Magnetorezistorski senzor: a) tipična karakteristika, b) detekcija ugaone pozicije (brzine)

2.4. KAPACITIVNI SENZORI BLIZINE

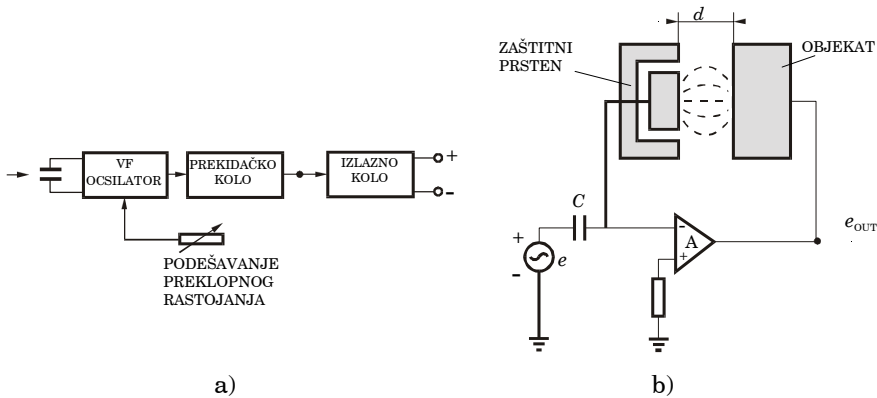
Princip rada. Kapacitivni senzori blizine sastoje se od kondenzatora kao primarnog osetilnog elementa koji se priključuje na oscilator ili pojačavač. U oba slučaja kapacitivnost kondenzatora menja se zbog ulaska objekta i promene dielektrične konstante između elektroda ili zbog promene rastojanja između elektroda od kojih je jedna na aktivnoj površini senzora, a druga na objektu.

Konstrukcija sa RC-oscilatorom napravljena je tako da pojava objekta između elektroda dovede do nastanka naizmeničnog napona (slika 2.12.a). U prekidačkom kolu (ispravljač sa Šmitovim triggerom) naizmenični napon oscilatora se ispravlja i prekida, a rezultujući jednosmerni napon menja ON/OFF stanje izlaznog stepena. Podešavanjem povratne sprege između oscilatora i prekidačkog kola postavlja se vrednost preklopnog rastojanja.

Konstrukcija sa pojačavačem obično ima kapacitivni senzor blizine sa promenljivim rastojanjem između elektroda (slika 2.12.b). Izlazni napon e_{OUT} je

$$e_{OUT} = -\frac{KCe}{S}d, \quad (2.15)$$

gde su: K konstanta, C kapacitivnost na ulazu u pojačavač, e amplituda naizmeničnog pobudnog napona i S aktivna površina elektroda. Naizmenični napon se ispravlja i upoređuje sa naponom praga Šmitovog trigerera, koji je podešen na vrednost ekvivalentnu preklopnom rastojanju. Izlaz trigerera menja ON/OFF stanje izlaznog stepena.



Slika 2.12. Kapacitivni senzor blizine: a) blok-šema sa oscilatorom, b) šema sa pojačavačem

Opseg delovanja zavisi od vrste materijala od kojeg je napravljen radni objekat. Razlikuju se tri slučaja:

- Radni objekat je od neprovodnog materijala – dielektrika (staklo, drvo, plastika). Promena dielektrične konstante medijuma u aktivnoj zoni je mala, zbog čega je preklopno rastojanje malo (20–30 mm);
- Radni objekat je od metala, tako da do promene kapacitivnosti dolazi na većoj udaljenosti nego u prethodnom slučaju, tj preklopno rastojanje je oko 40 mm;
- Radni objekat je od metala koji je uzemljen, pa je apsorpcija naelektrisanja još više izražena, a preklopno rastojanje približno dvostruko veće nego u prvom slučaju (50–60 mm).

Prisustvo vlage i prašine, takođe i porast temperature, povećavaju preklopno rastojanje. Zato se tačna vrednost udaljenosti

pri kojoj dolazi do preključivanja može utvrditi jedino za određene radne uslove. Kapacitivni senzori neupotrebljivi su za detekciju predmeta od poroznih materijala (stiropor, spužva) jer imaju loše dielektrične osobine, odnosno njihova relativna dielektrična konstanta je blizu jedinice.

Konstrukcija i tehničke karakteristike. Blok-struktura i konstrukcija kapacitivnih senzora blizine slična je induktivnim – najčešće se prave u obliku cilindra prečnika $d=10-30$ mm i dužine $l=60-100$ mm ili prizme dimenzija od $40\times 40\times 100$ mm do $80\times 80\times 40$ mm. Standardni test objekat je od stakla ili PVC plastike, dimenzija $100\times 100\times 100$ mm. Za objekte od drugih materijala deklarišu se odgovarajući korekcionni faktori: za metale 1, za vodu 1, za staklo 0,5, za keramiku 0,4, za drvo 0,2–1. Preklopno rastojanje podešljivo je u intervalu od 2–10 mm do 5–50 mm, histerezis je $10\%S_n$, obnovljivost je manja od 0,01 mm, frekvencija preključivanja je 10–100 Hz, radna temperatura je od -30 °C do $+70$ °C, dobra je podnošljivost na mehaničke vibracije amplitude do 1 mm i frekvencije do 50 Hz, napon napajanja je jednosmerni (10–30 V) ili naizmjenični (20–220 V, 50 Hz).

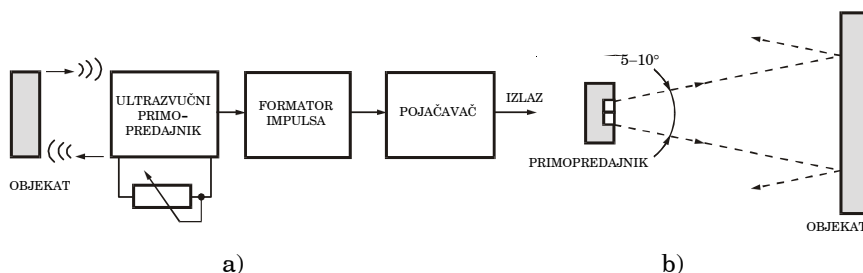
2.5. ULTRAZVUČNI SENZORI BLIZINE

2.5.1. Princip rada.

Ultrazvučni senzori blizine sastoje se od ultrazvučnog primopredajnika, uređaja za formiranje izlaznog signala i pojačavača (slika 2.13.a). Primopredajnik periodično emituje ultrazvučni talas frekvencije 10–400 kHz, a zatim prima reflektovani talas (eho) od radnog objekta. U uređaju za formiranje izlaznog signala određuje se vreme t između emitovanja i prijema signala i , na osnovu poznate brzine c prostiranja ultrazvučnog talasa kroz merni medijum (obično je to vazduh), izračunava udaljenost objekta:

$$x = \frac{tc}{2}. \quad (2.16)$$

Ovaj način rada često se označava akronimom TOF (*time of flight*). Rezultat računanja upoređuje se sa preklopnim rastojanjem i, u skladu s tim, dolazi do promene izlaznog signala sa logičke nule na logičku jedinicu, ili obrnuto – sa logičke jedinice na logičku nulu – što zavisi od toga da li se objekat približava ili udaljava.



Slika 2.13. Ultrazvučni senzor blizine: a) strukturna blok-šema, b) emitovani i echo signal

Od senzora do objekta ultrazvuk se širi po konusu $5-10^\circ$ (slika 2.13.b). Najčešće se senzori isporučuju sa inicijalno postavljenim preklopnim rastojanjem, pa se onda posebnim potenciometrom podešava željena vrednost unutar 0–100% maksimalne vrednosti. Podaci o podešenoj vrednosti odnose se na slučaj kada se objekat kreće duž ose zračenja. Objekat se može kretati i normalno na osu zračenja, ali je tada efektivno prekloпно rastojanje potrebno odrediti eksperimentom.

2.5.2. Problemi primene

Detekcija blizine objekata na osnovu vremena prelaska ultrazvuka od predajnika do prijemnika u načelu je jednostavna, ali se u gradnji senzora javlja više problema (nejednaka brzina prostiranja ultrazvuka u različitim medijumima, zavisnost brzine od temperature i pritiska vazduha, slabljenje intenziteta zbog radijalnog širenja i apsorpcije, delovanje šuma i dr.).

Brzina ultrazvuka c različita je u pojedinim medijumima. Na primer, u vodi je 1500 m/s, u metalima je 3 000–6 000 m/s, u staklu

5 500 m/s, u stiroporu samo 500 m/s. O ovome se vodi računa u fazi projektovanja senzora, jer se senzor gradi za određenu namenu.

Zavisnost brzine ultrazvuka od temperature vazduha pri normalnom atmosferskom pritisku opisuje se jednačinom

$$c = \sqrt{\frac{\kappa RT}{M}} = 331,5 \cdot \sqrt{T / 273}, \quad (2.17)$$

gde su: κ odnos specifične toplote vazduha pri konstantnom pritisku i specifične toplote vazduha pri konstantnom volumenu, R univerzalna gasna konstanta i T apsolutna temperatura. Na osnovu ove zavisnosti, inače, pravi se apsolutni termodinamički akustički termometar, a u konkretnom slučaju služi za računanje stvarne vrednosti c u jednačini (2.16). Na primer, na temperaturi $T=273$ K (0 °C) brzina ultrazvuka je 331,5 m/s, a na temperaturi $T=293$ K (20 °C) brzina je 343,1 m/s.

Zavisnost brzine ultrazvuka od atmosferskog pritiska p (odnosno nadmorske visine H) opisuje se jednačinom:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}}, \quad (2.18)$$

pri čemu treba uzeti u obzir da je gustina vazduha funkcija temperature: $\rho=\rho(T)$. Na primer, na 15 °C pri normalnom atmosferskom pritisku na nivou mora brzina je $c=340,29$ m/s, a na 1000 m nadmorske visine je $c=336,43$ m/s. Varijacije pritiska vazduha u radnoj okolini robota u praksi su zanemarljive, tako da se jednom izračunata korekcija brzine prema jednačini (2.18) može smatrati konstantnom: $c(\rho)=\text{const}$.

Zavisnost brzine ultrazvuka od relativne vlažnosti vazduha opisuje se jednačinom

$$c = c_0(1 + 2,8 \cdot 10^{-7} p_v), \quad (2.19)$$

gde je p_v parcijalni pritisak vodene pare [Pa] i c_0 brzina ultrazvuka na 0 °C.

Slabljenje zbog radijalnog prostiranja. Predajnik ultrazvuka u praksi ima prizmatični, cilindrični ili složen oblik. Ako je udaljenost izvora šuma veća za pet puta u odnosu na dimenzije predajnika, on se može tretirati kao tačkasti. Tada se ultrazvuk širi radijalno i intenzitet I mu opada sa kvadratom radijalnog rastojanja d od predajnika:

$$I = k/d^2. \quad (2.20)$$

Pritisak ultrazvučnog talasa na rastojanju d_1 od predajnika je $P_1=10\log(I_1/I_0)$, a na rastojanju d_2 je $P_2=10\log(I_2/I_0)$. Pritisak opada sa povećanjem radijalne udaljenosti:

$$P_1 - P_2 = 10 \log \frac{I_1}{I_0} - \log \frac{I_2}{I_0} = -20 \log \frac{d_1}{d_2} \text{ [dB]}, \quad (2.21)$$

odakle nije teško izračunati da pri udvostručavanju udaljenosti slabljenje iznosi 6 dB.

Slabljenje ultrazvučnog talasa zbog apsorpcije u vazduhu proporcionalno je približno kvadratu frekvencije. Zato merni opseg senzora postaje sve manji sa porastom frekvencije ultrazvuka i ograničen je na 10 m pri frekvenciji od 100 kHz. Apsorpcija se obično izražava u dB za rastojanje od 100 m i određenu frekvenciju.

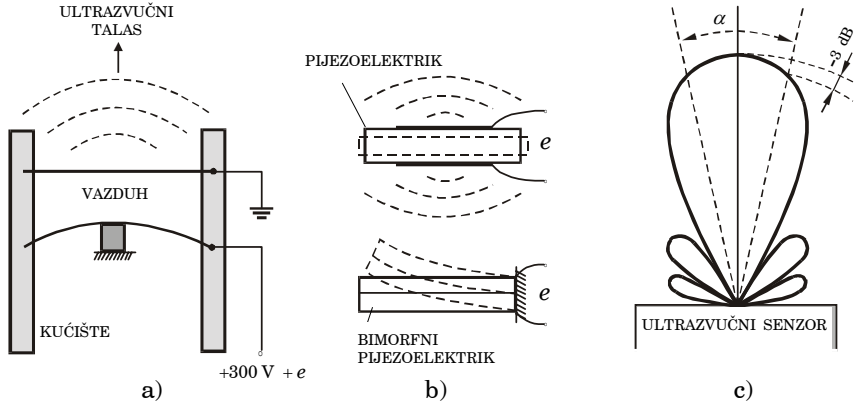
Na slabljenje utiče i orijentacija reflektujuće površine. Kada ultrazvučni talas stigne do objekta, on se reflektuje pod uglom koji je jednak upadnom uglu, pa se orijentacija objekta mora poznavati sa tačnošću od nekoliko stepeni. Ako je površina hrapava sa neravninama srazmernim talasnoj dužini ultrazvuka, tada pri refleksiji nastaje i difuzija, što se manifestuje kao određeno slabljenje signala.

Ultrazvučni šumovi nastaju zbog različitih procesa obrade u radnoj okolini robota: usitnjavanja metala, mašinske obrade metala, zavarivanja, raspršivanja boje i dr. Poželjno je da senzori rade sa frekvencijom ultrazvuka većom 100 kHz kako bi se izbegao uticaj šuma.

2.5.3. Gradnja i primena

Način gradnje. Ultrazvučni senzori blizine prave se kao elektrostatički ili pjezoelektrični. Elektrostatički imaju radnu frekvenciju do 250 kHz. Između dve tanke metalne elektrode priključen je jednosmerni prednapon, tako da se one privlače (slika 2.14.a). Kada se na ovaj prednapon superponira naizmenični napon, na isti način (sa istom frekvencijom) menja se i privlačna sila između elektroda. Obično je jedna elektroda fiksirana, a druga upeta po obodu i vibrira u skladu sa silom proizvođači ultrazvučne talase. Uređaj može da radi i kao prijemnik: akustički signali uslovljavaju

vibraciju elastične membrane modulišući tako kapacitivnost između elektroda, koji se detektuje odgovarajućim elektronskim kolima.



Slika 2.14. Ultrazvučni senzori: a) elektrostatički, b) pjezoelektrični, c) dijagram usmerenosti

Pjezoelektrični primopredajnici prave se od pjezoelektričnih materijala. Kada se pjezoelektrična membrana priključi na naizmenični napon, ona počne da osciluje i deluje kao generator ultrazvuka (slika 2.14.b). Membrana može biti i bimorfna, tj. sastavljena od dva sloja, pri čemu se pod delovanjem napona jedan sloj isteže a drugi sabija (ili zadržava iste dimenzije). Membrana je prečnika 10–20 mm. Da bi se dobio što veći intenzitet emitovanih talasa, membrana se projektuje da radi na rezonantnoj frekvenciji

$$f_r = \frac{1}{2h} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{c_m}{2h}, \quad (2.22)$$

gde su: h debljina membrane, E Jangov modul elastičnosti i $c_m = (E/\rho)^{0.5}$ brzina ultrazvuka u pjezoelektričnoj membrani. Veća rezonantna frekvencija ima se za tanju membranu. Najpovoljniji rezultati postižu se pomoću tankoslojnih membrana 30–100 μm od pjezopolimera PVDF. Pošto je $c_m = f\lambda$, gde je λ talasna dužina ultrazvuka, dobija se da je pri rezonantnoj fekvenciji talasna dužina jednaka dvostrukoj debljini membrane $\lambda = 2h$. U praksi je rezonantna frekvencija 1–10 MHz.

Tipični dijagram prostiranja ultrazvuka sastoji se od glavne i pomoćnih latica (2.14.c). Kao mera usmerenosti (direktivnosti) obično se uzima ugao α koji omeđuje granice od -3 dB, tj. tačke u kojima je amplituda signala manja za 3 dB u odnosu na tačke duž

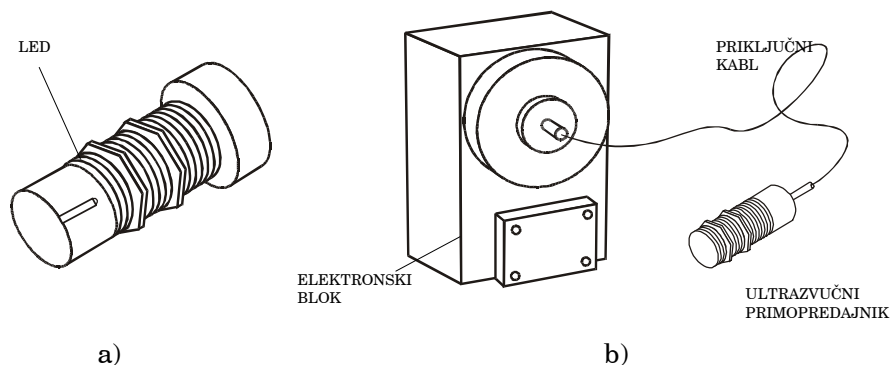
ose prostiranja x gde je $\alpha=0^\circ$. Širina snopa računa se pomoću formule:

$$\sin \frac{\alpha}{2} = 0,516 \frac{\lambda}{D}, \quad (2.23)$$

gde je D efektivni prečnik membrane. Manja talasna dužina i veći prečnik membrane daju bolju usmerenost.

Tipične konstrukcije ultrazvučnog senzora blizine imaju oblik prizme ili cilindra, približno istih dimenzija kao kod induktivnih ili kapacitivnih senzora blizine. (slika 2.15). Glava sa primopredajnikom može biti odvojena od elektronskog dela, čime se omogućava ugradnja i na nepristupačnim mestima.

Test objekat određuje se karakteristikama reflektujuće površine radnog objekta. Naime, objekat može biti od čvrstog, tečnog ili praškasto-granulastog materijala, ali je bitno da mu je površina glatka, sa neravninama manjim od 0,2 mm. Debljina objekta treba da je veća od 0,01 mm, a reflektujuća površina da je pod uglom $90 \pm 3^\circ$ u odnosu na pravac prostiranja ultrazvuka.



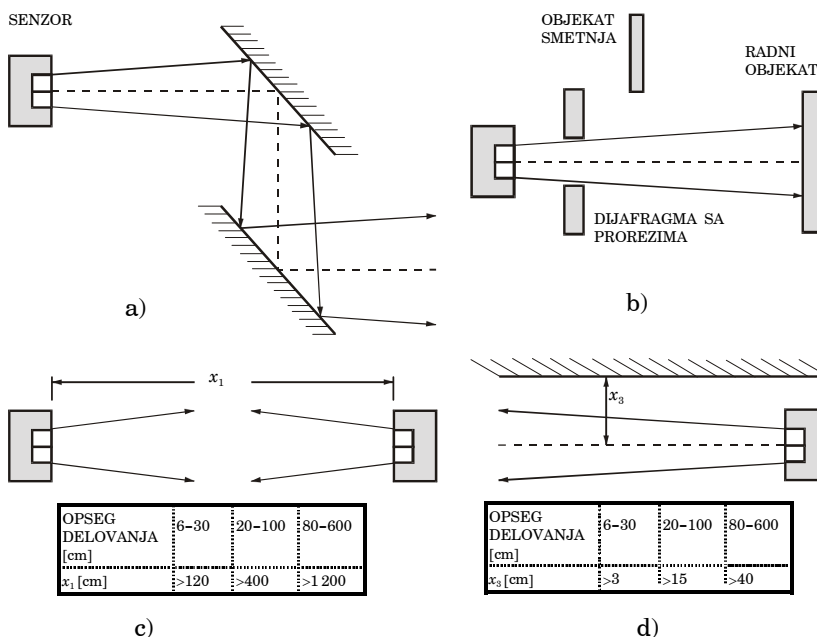
Slika 2.15. Ultrazvučni senzori blizine: a) cilindrični tip, b) prizmatični tip sa odvojenim primopredajnikom

Sa porastom temperature slabe reflektujuća svojstva objekta, pa zato radna temperatura treba da je manja od kritične t_{kr} . Ova temperatura ustanovljava se eksperimentom, a svojstvena je vrsti materijala od kojeg je napravljen objekat. Materijali kao što su pa-

muk, stiropor i guma imaju visok koeficijent apsorpcije ultrazvuka, pa je prisustvo objekata od takvog materijala moguće detektovati samo u odnosu na pozadinu sa dobrom refleksijom.

Ugradnja. Prilikom ugradnje ultrazvučnih senzora blizine vodi se računa o nizu iskustvenih pravila korisnih za smanjivanje interferencije sa drugim ultrazvučnim sensorima:

- za zakretanje ultrazvučnog talasa primenjuju se najviše dva reflektora sa kojima je moguće talas zakrenuti maksimalno dva puta po 90° i dovesti ga na osu paralelnu osi senzora (slika 2.16.a);
- za smanjivanje refleksije sa drugih objekata koji se nalaze u blizini radnog objekta može se upotrebiti dijafragma sa prorezima (slika 2.16.b);

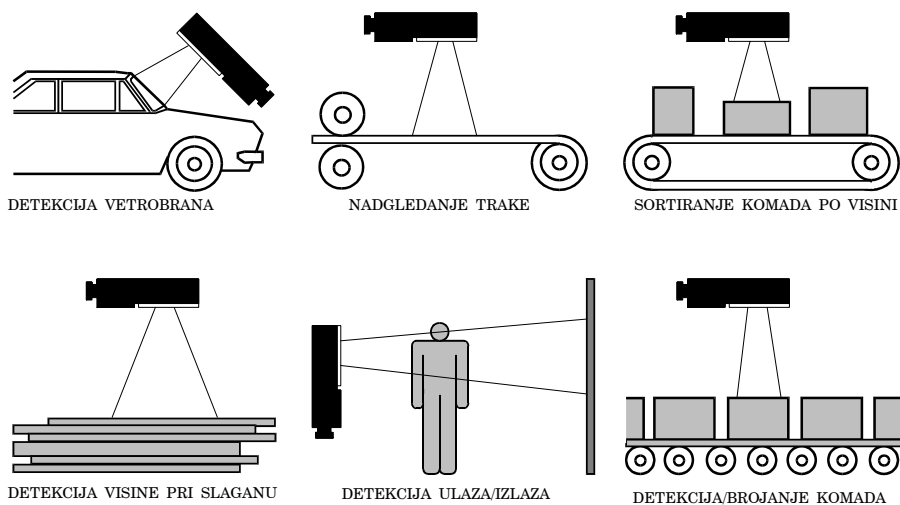


Slika 2.16. Ugradnja ultrazvučnih senzora: a) zakretanje ultrazvuka, b) primena zastora sa prorezima, c) senzori na istoj osi, d) senzor sa osom duž ravnog zida

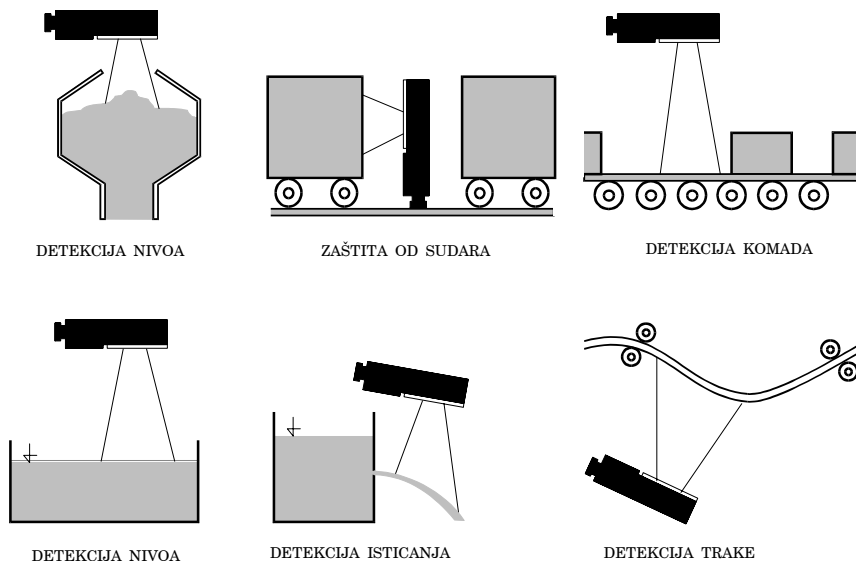
- za detekciju objekata raspoređenih lepezasto u odnosu na senzor može se upotrebiti zastor sa odgovarajućim brojem proreza koji se otvaraju sukcesivno ili po nekom programu;

- za dva senzora postavljena jedan naspram drugog na istoj osi potrebno je obezbediti minimalno dozvoljeno međusobno rastojanje x_1 , koje zavisi od preklopnog rastojanja, a određuje se eksperimentom (slika 2.16.c);
- za dva senzora sa paralelnim osama, koji zrače u istom smeru, potrebno je izvesno rastojanje x_2 između osa da ne bi došlo do uzajamne interferencije, pri čemu x_2 zavisi od preklopnog rastojanja i orijentacije objekta u odnosu na osu senzora;
- za senzor čija je osa paralelna nekom zidu neophodno je da se senzor postavi na rastojanje x_3 od zida (slika 2.16.d);
- za senzor koji se montira u koridoru između dva zida potrebno je obezbediti minimalno rastojanje x_4 između ose i zidova, što se, takođe, određuje eksperimentom

Primena. Na slici 2.17 ilustrovane su tipične primene ultrazvučnih senzora blizine.



Slika 2.17. Primeri primene ultrazvučnih senzora



Slika 2.17. Nastavak

2.6. OPTOELEKTRONSKI SENZORI BLIZINE

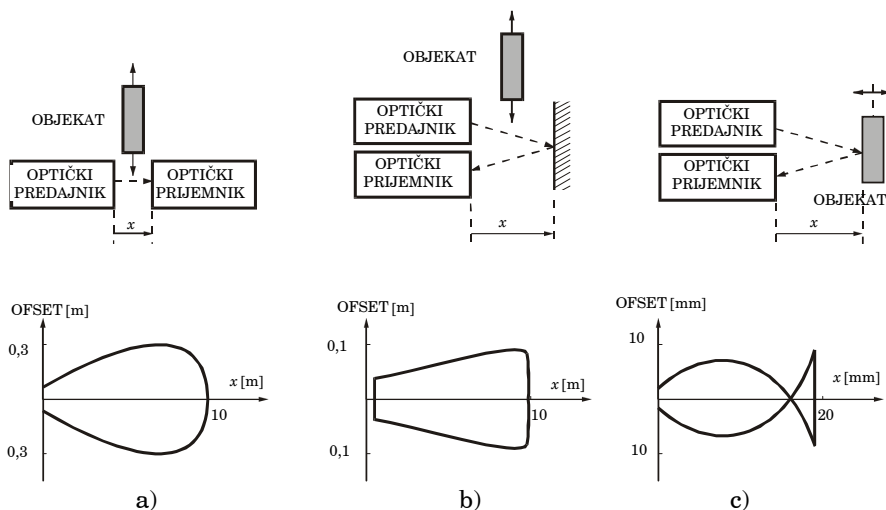
Princip rada. Optički senzori blizine sastoje se od optičkog para (*optocoupler*) – predajnika i prijemnika. Kao predajnici služe svetleće diode (LED) diode i laserske diode (LD), a kao prijemnici upotrebljavaju se fototranzistori, fotodiode i fotoopornici. Najrasprostranjenija je kombinacija LED dioda i fototranzistor, pri čemu se radni predmet detektuje prekidanjem ili refleksijom optičkog signala. Svetlost se obično ne emituje kontinualno već u impulsima velike snage, ali tako da je srednja snaga impulsa u granicama dozvoljenog opsega koji se definiše za kontinualni rad. Na taj način postiže se veći put od predajnika do prijemnika. Za LED diodu ovaj put je ograničen na nekoliko metara, a za LD diodu iznosi više desetina metara.

Predajnik i prijemnik rade usaglašeno u određenom području optičkog spektra. Obično je optički signal u području vidljive svetlosti ($\lambda=0,38-0,76 \mu\text{m}$), u području kratkotalasne infracrvene

svetlosti ($\lambda=0,76-3\ \mu\text{m}$) ili u području srednjetalasne infracrvene svetlosti ($\lambda=3-8\ \mu\text{m}$). Više se primenjuju senzori u infracrvenom području jer normalno rade i u okolini sa dnevnim svetlom.

Detekcija objekta na osnovu prekidanja optičkog signala svodi se, zapravo, na prepoznavanje prisustva objekta bez obzira na njegovu poziciju između predajnika i prijemnika, tj. na mesto gdje je zrak prekinut (slika 2.18.a). Ovaj način rada je veoma pouzdan i pogodan je za objekte sa slabo reflektujućom površinom. Predajnik i prijemnik svetlosti obično su jedan naspram drugog, ali mogu biti i jedan pored drugog kada se koristi ogledalo kao retroreflektor iza objekta (slika 2.18.b).

Optoelektronski senzori sa refleksijom na objektu, međutim, prepoznaju prisustvo objekta na tačno određenoj udaljenosti koja zavisi od intenziteta emitovane svetlosti, koeficijenta refleksije materijala od kojeg je objekat napravljen i od orijentacije objekta u odnosu na predajnik i prijemnik (slika 2.18.c). Reflektovana svetlost ima difuzni karakter, pa se zato senzori sa ovakvim načinom rada nazivaju difuzni.



Slika 2.18. Optoelektronski senzori: a) prekidanje optičkog zraka, b) refleksija sa površine iza objekta, c) refleksija sa objekta

Za standardni test objekat upotrebljava se bela ili siva test karta 200×200 mm, a za druge materijale daju se faktori korekcije određeni eksperimentalno. Krive odziva za optoelektronske senzore pokazuju zavisnost intenziteta upadne svetlosti od pozicije objekta.

Intenzitet je najveći duž optičke ose prijemnika x i smanjuje se sa udaljavanjem od ose. Kriva odziva je simetrična, a površina koju omeđava predstavlja najveću oblast detekcije za datu osetljivost prijemnika. Sa povećanjem osetljivosti oblast detekcije se širi, a sa smanjivanjem osetljivosti oblast se skuplja. Na slici 2.18 prikazani su tipični oblici ovih površina (*beam pattern*). Apscisa pokazuje opseg x , a ordinata ofset aktiviranja senzora zbog širenja optičkog zraka sa rastojanjem x .

Najveći problem u primeni optoelektronskih senzora blizine je sakupljanje prašine, ulja i vodene pare na mikrosočivu predajnika, odnosno prijemnika, zbog čega dolazi do prigušenja optičkog signala. Zato je potrebno predvideti veće pojačanje u prijemniku. Eksces pojačanja je faktor koji se definiše kao relativno pojačanje u odnosu na minimalne radne uslove. Preporučuje se da faktor ima vrednost 1,5 za čist vazduh bez prašine, 5 za vazduh sa malo prašine i redovnim čišćenjem sočiva, 10 za umereno prljav vazduh i povremeno čišćenje sočiva i vrednost 50 za prljav vazduh i neredovno čišćenje sočiva.

Za sve optoelektronske senzore blizine daje se i vreme odziva koje je potrebno za promenu izlaza kada se ulaz promeni iz svetla u mrak ili obrnuto. Vreme odziva je važno kod detekcije malih pokretnih objekata. Preporučuje se da minimalno vreme odziva za detekciju objekta širine w koje se kreće brzinom v bude

$$T_{\min}=w/v, \quad (2.24)$$

a ako je širina objekta w samerljiva sa efektivnim poprečnim presekom optičkog zraka d , tada vreme odziva treba da je

$$T_{\min}=(w-d)/v. \quad (2.25)$$

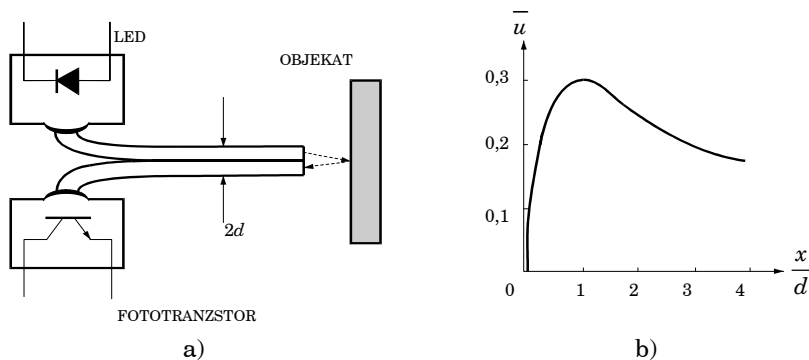
Način gradnje. Optički parovi grade se u jednom ili u dva nezavisna kućišta od plastike. Kućišta su U-tipa, cilindričnog ili pravougaonog oblika, malih su dimenzija i moguće ih je ugraditi skoro na svakom mestu. Na manje dostupna mesta optički zrak može se dovesti pomoću ogledala ili optičkog vlakna. Optičko vlakno pogodno je zbog malih dimenzija ($d=100-400 \mu\text{m}$) i neznatnog uticaja progiba na amplitudu optičkog signala. Na slici 2.19.a prikazan je optoelektronski senzor blizine sa produžecima od optičkog vlakna: dovodno vlakno povezano je sa LED diodom, a prijemno vlakno sa fototranzistorom. Izlazni signal zavisi od rastojanja između objekta i optičkih vlakana. Za $x=0$ i $x=\infty$ na

fototranzistoru nema signala, što znači da će refleksija, odnosno izlazni signal za neko x imati maksimalnu vrednost.

Statička karakteristika ovog u suštini kontinualnog senzora jeste:

$$\bar{u} = \frac{u - u_0}{u_0} = f(x/d), \quad (2.26)$$

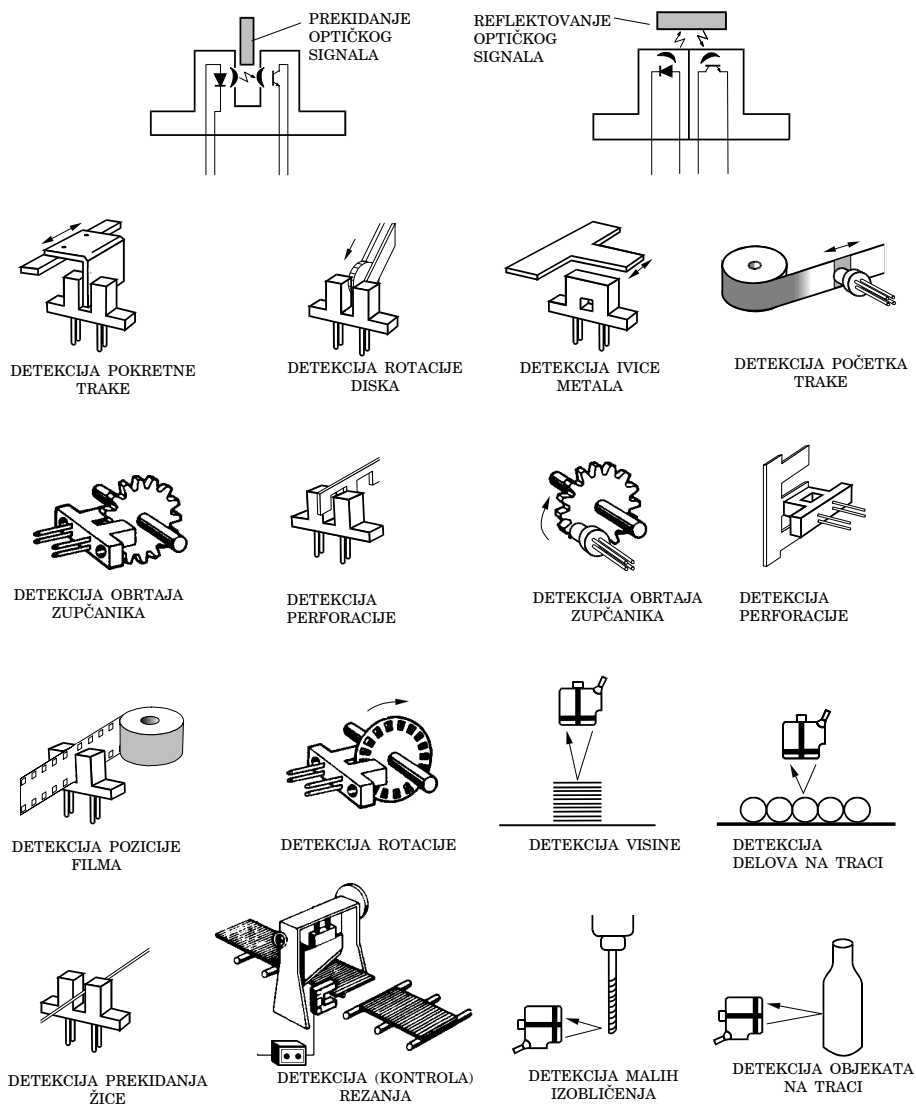
gde su u i u_0 aktuelni i maksimalni izlazni napon na fototranzistoru, a x/d relativna udaljenost objekta u odnosu na prečnik vlakna (slika 2.19.b). Potencijetrom u izlaznom kolu diode podešava se nivo napona pri kome dolazi do promene izlaza, odnosno podešava se željeno preklopno rastojanje. U novije vreme optička vlakna prave se i od akrilata, tj. providnog polimera. Plastična vlakna su jeftinija od staklenih, ali jako prigušuju svetlost u određenim opsezima talasnih dužina (naročito IC), osetljivi su na hemijske uticaje i radna temperatura im je ograničena u intervalu od $-30\text{ }^\circ\text{C}$ do $+70\text{ }^\circ\text{C}$.



Slika 2.19. Senzori blizine sa produžecima od optičkog vlakna: a) izgled senzora, b) statička karakteristika

Tehničke karakteristike. Preklopno rastojanje optoelektronskih senzora kreće se u širokom dijapazonu od 0–1 mm za mala, 0–200 mm za srednja i 0–4 m za velika rastojanja, pri čemu su navedeni podaci za senzore sa refleksijom optičkog signala. Ukoliko se kao optički izvor upotrebi LD, opseg delovanja može biti više desetina metara. Slično je i za rastojanje između predajnika i prijemnika kod senzora sa prekidanjem optičkog signala. Frekvencija prekidanja iznosi do 400 Hz, ponovljivost je $\pm 5\%$ opsega, histerezis je $\pm 3\%$, radna temperatura je 0–50 $^\circ\text{C}$, napon napajanja je jednosmerni 10–30 V.

Primena. Na slici 2.20 prikazani su raznovrsni primeri koji ukazuju na velike mogućnosti primene optoelektronskih senzora.



Slika 2.20. Primeri primene optoelektronskih senzora blizine na bazi LED diode i fototranzistora

LITERATURA

1. M.Machovschi, C.Paupot: „Study of variable inductance transducers as proximity sensors: I. Computer assisted study“, *Measurement Science and Technology*, 1 (1031–1040), 1990.
2. M.Machovschi, C.Paupot: „Study of variable inductance transducers as proximity sensors: II. Experimental study using "C"-type magnetic circuits“, *Measurement Science and Technology*, 1 (1291–1296), 1990.
3. M.Machovschi, C.Paupot: „Study of variable inductance transducers as proximity sensors: III. Analytical expression for the variation of inductance as a function of sensor/target distance“, *Measurement Science and Technology*, Vol. 9, No. 2 (276–279).
4. L.Hardy, A.Billat, G.Villerman–Lecolier: „Flat eddy–current matrix sensor for detecting metallic objects“, *Sensors and Actuators A*, No. 29 (13–19), 1991.
5. „Senzors“, kataloge, Pepperl+Fuchs, Mannheim, Germany, 1990.
6. P.P.L.Regtein: „Sensors for applications in robotics“, *Sensors and Actuators A*, Vol. 10, No. 3–4 (195–218), 1986.
7. M.Popović: „Senzori i merenja“, Viša elektrotehnička škola, Beograd, 1994.
8. E.A.Zak, N.P.Kravčenko: „Promyšlennoe primenienie amplitudnyh volokonno–optičeskih datčikov“, *Izmeriteljnaja tehnika*, No. 12 (11–13), 1991.
9. F.Kičić: „Senzori“, *Elektronika u primjeni*, 41/1 (53–58), 1991.
10. „Induktivni blizinski prekidač“, katalog, Institut „Mihajlo Pupin“ – Mikroelektronika, 1990.
11. „Senzors catalog 95–A“, IMF EFECTOR, a subsidiary of IMF ELECTRONIC, USA, 1995.
12. „Photoelectric controls“, katalog, Banner Engineering Corporation, Mineapolis, 1995.
13. „Catalog RLC13–1“, Red Lion Controls, York, 1995.

3

SENZORI SILE I MOMENTA

3.1. OPŠTE KARAKTERISTIKE MERENJA SILE I MOMENTA

Potreba za senzorima sile u robotici. Kao što je istaknuto, industrijski robot (manipulator) je mehanizam koji se sastoji od nekoliko segmenata povezanih u seriju. Kod izvršavanja radnih operacija segmenti se kreću u odnosu jedan na drugog, po unapred zadatoj putanji. Prema tome, upravljanje određenom operacijom u suštini se svodi na poziciono upravljanje. Tokom izvršavanja automatskih operacija kao što su asembliranje, poliranje ili zavarivanje robot kontroliše svoje kretanje na osnovu informacija o poziciji sve dok ne dođe u kontakt sa radnim predmetom. U tom trenutku vizuelna detekcija pozicije predmeta najčešće je otežana. Ako bi robot nastavio da održava putanju u uslovima neodređenosti, kontaktne sile bi postajale sve veće, što bi moglo da dovede do loma radnog predmeta ili robota.

Da se to ne bi desilo, robot nakon detekcije kontakta prelazi sa pozicionog upravljanja na upravljanje zasnovano na informaciji o silama. Sistem automatskog upravljanja, sa negativnom spregom po sili, pomera robot u smeru smanjivanja razlike između aktuelne vrednosti kontaktne sile i njene referentne vrednosti zadate programom, što je ekvivalentno praćenju trajektorije kod pozicionog upravljanja. Usaglašavanje ili prelaz sa jednog na drugo upravljanje može biti pasivno (manipulator elastičan, sistem sa pozicionom povratnom spregom) ili aktivno (manipulator čvrst, sistem sa povratnom spregom po sili).

Aktivno usaglašavanje je upravljanje pri kojem senzori sile daju informaciju za korekciju pozicije manipulatora. Kada sila prelazi određenu vrednost, robot se pomera u smeru smanjenja sile. Ova metoda je primenljiva za bilo koju operaciju. Međutim, interakcija između kontaktnih sila i pomaka komplikovana je za programiranje, jer treba definisati pomeranja duž i oko osa x, y, z pod delovanjem svih šest komponenti vektora $\mathbf{F}[F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]^T$. Izvršavanje automatskih operacija na ovaj način relativno je sporo, jer je ukupno vreme odziva aditivna kombinacija vremena potrebnog za dobijanje informacije, generisanje upravljačkog dejstva, proračun putanje i za pozicioniranje servomotora.

Mesto na kome se ugrađuje senzor sile treba da ima veću elastičnost (manju krutost) od sistema platforma–manipulator–hvataljka jer se od senzora zahteva visoka osetljivost. Na tom mestu manipulator istovremeno mora da zadrži određenu čvrstinu, što se rešava ugradnjom mehaničkih graničnika.

Pasivni prelaz sa pozicionog upravljanja na upravljanje silom je brži i jednostavniji, jer je pretvaranje sile u pomeraj robota radi smanjenja sile direktno proporcionalno i nije potrebna programska podrška. Direktna kompenzacija sile omogućena je posebnom konstrukcijom zglobova šake sa tzv. izmaknutim centrom prilagođavanja. Izmaknuti centar prilagođavanja dozvoljava kretanje samo duž i oko osa x i y , pri čemu je koordinatni početak u vrhu šake, odnosno u vrhu radnog komada kojeg manipulator drži.

Tipologija senzora sile. Za merenje sila i momenata postoji veliki broj raznovrsnih senzora. Klasični senzori mere samo jednu komponentu ovih vektorskih veličina. U robotici je to nedovoljno jer su često potrebne informacije o sve tri komponente sile $\mathbf{F}(F_x, F_y, F_z)$ i sve tri komponente momenta $\mathbf{M}(M_x, M_y, M_z)$, odnosno neophodno je potpuno poznavanje vektora

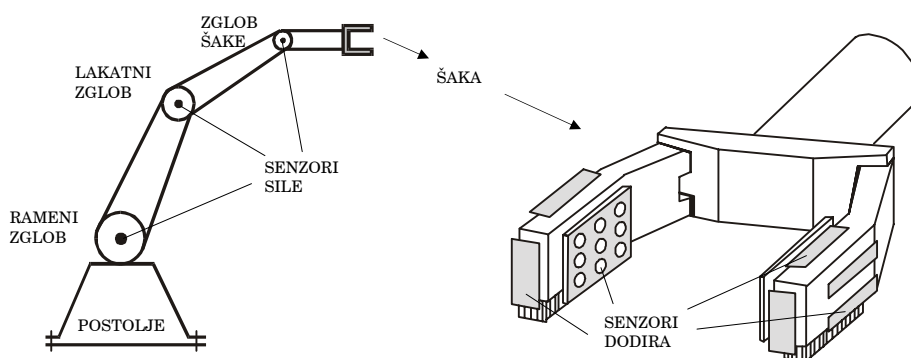
$$\mathbf{F} = \mathbf{F}[\mathbf{F}, \mathbf{M}]^T = \mathbf{F}[F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]^T. \quad (3.1)$$

Najcelishodnija tipologija senzora sile \mathbf{F} koji se primenjuju u robotici provodi se prema mestu ugradnje, odnosno mestu merenja sile (slika 3.1):

- *Senzori sile u jednom od zglobova manipulatora.* Sila između robota i radnog predmeta odražava se kao opterećenje na sistem upravljanja. To znači da će u zglobovu koji se, na

primer, pomera pomoću jednosmernog motora sile delovati kao opterećenje motora, što će se odraziti na vrednost armaturne struje. Posredno merenje sile na osnovu struje armature ima značajne prednosti jer se primenjuju već postojeći uređaji i nije potrebna ugradnja posebnog senzora sile. Nedostatak ove tehnike je mala tačnost pošto nisu uzeti u obzir efekti trenja, težine i inercijalne sile manipulatora;

- *Senzor sile u zglobu šake* montira se između poslednjeg segmenta manipulatora i šake (hvataljke). Senzor ima elastičnu strukturu koja se deformiše proporcionalno delovanju sile/momenta i detektore za merenje te deformacije. Većina današnjih senzora sile u robotici su ovoga tipa, jer se pomoću njih smanjuje greška merenja zbog velike težine i inercije manipulatora. Na izlaz senzora, međutim, utiču težina šake i njen relativni položaj u odnosu na robota;



Slika 3.1. Mesta ugradnje senzora sile

- *Senzori sile na vrhovima prstiju* u odnosu na prethodni tip imaju prednost pošto su smešteni u samoj blizini kontakta sa radnim predmetom gde sila i deluje. Efekti težine i inercije robota svedeni su na najmanju moguću meru. Treba napomenuti da senzori sile i momenta montirani u zglobu šake, odnosno na vrhovima prstiju, imaju izvanrednu osetljivost i veliku brzinu odziva, ali da je i pored toga brzina servosistema za upravljanje silom mala jer je ograničena znatno većom vremenskom konstantom manipulatora. Više senzora na vrhovima prstiju omogućava detekciju prostorne

distribucije sila na kontaktnoj površini, o čemu će biti reči u okviru taktilne vizije. Tu se razmatraju i lokalni detektori momenta na vrhovima prstiju, tzv. senzori klizanja;

- *Senzori sile postavljeni izvan robota*, obično na radnom stolu na kome je fiksiran predmet obrade. Mehaničko delovanje manipulatora prenosi se sa predmeta na sto kao podlogu, pa se na osnovu informacije o deformaciji stola računa vrednost sile. Jednostavnost ugradnje je glavna prednost senzora ovog tipa, a nedostatak je ograničena primena na jednostavnije operacije.

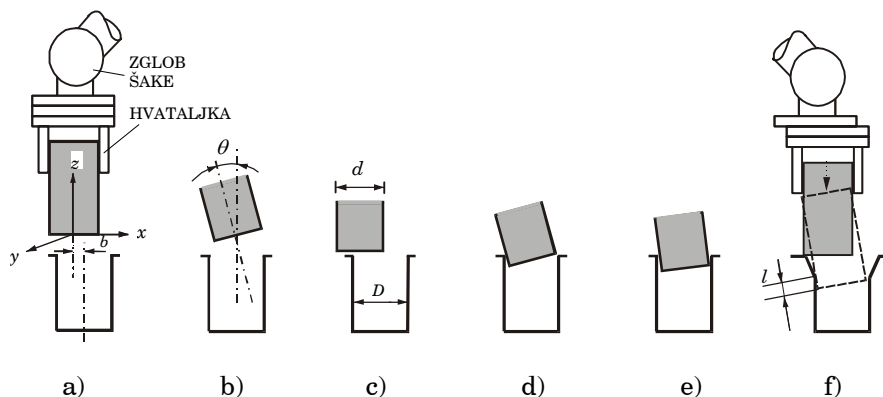
3.2. ASEMBLIRANJE I KONTAKTNE SILE

Asembliranje je sklapanje dvaju ili više mehaničkih elemenata da bi se napravila neka mašina ili drugi proizvod. Hvatalkama robota elementi se pridržavaju, prinose jedan drugom i uklapaju na zadati način. Između hvataljke i elementa javlja se sila koja zavisi od tipa hvataljke i elementa, a takođe i od operacije asembliranja. Između mnogobrojnih operacija asembliranja najinteresantnije je uvlačenje (insertovanje) cilindričnog elementa u ležište.

Uvlačenje. U idealnom slučaju asembliranje bi moglo da se tretira kao problem prostornog pozicioniranja. Ubacivanje cilindra u ležište moglo bi da se realizuje upotrebom senzora sile kao uređaja za merenje pozicije, tj. na osnovu informacije o sili pri kontaktu cilindra sa levom i desnom ivicom otvora bilo bi moguće odrediti centralnu poziciju cilindra.

Ova jednostavna metoda, međutim, ne može se uvek primeniti jer se prilikom uvlačenja cilindar i ležište najčešće nalaze u složenom međusobnom položaju. Razlog su dimenzione toleranse pri njihovoj izradi i nesavršenost hvataljke. Tipični položaj cilindra karakteriše se velikom bočnom greškom b i velikom ugaonom greškom θ (slika 3.2.a,b). Velika bočna greška potpuno onemogućava uklapanje (slika

3.2.c). Velika ugaona greška uzrokuje zaglavljivanje cilindra na otvoru ležišta (slika 3.2.d), dok pri manjim vrednostima ugaone greške deluju kontaktne sile koje oštećuju cilindar i ležište (slika 3.2.e). Da se savladaju kontaktne sile potrebne su i veće sile uklapanja.



Slika 3.2. Uvlačenje cilindra: a) bočna greška, b) ugaona greška, c) velika bočna greška, d) velika ugaona greška, e) mala ugaona greška, f) konverzija bočne greške u ugaonu

Analiza uvlačenja. Uvlačenje se vrši pomoću hvataljke koja drži cilindar tako da se on može zakretati oko hvatišta. Za uspešno uvlačenje potrebna je kontrola i bočne i ugaone greške. Zakošene ivice cilindra i/ili ležišta olakšavaju uvlačenje, ali se greške ne anuliraju. Kada se cilindar dovede u poziciju sa bočnom greškom b , hvataljka spušta cilindar koji klizi niz (zakošene) ivice otvora okrećući se oko hvatišta, tako da se bočna greška konvertuje u ugaonu θ (slika 3.2.f). Naravno, ugaona greška može nastati i na drugi način. Uspešno uvlačenje biće kada je kontakt cilindra i ležišta ostvaren na većoj dubini od l_{\min} :

$$l_{\min} \leq \mu D, \quad (3.2)$$

gde je μ koeficijent trenja, a D prečnik ležišta.

Minimalnoj dubini l_{\min} odgovara maksimalno dozvoljena ugaona greška θ_{\max} , koja se računa iz geometrijske relacije

$$\theta_{\max} = \sin \frac{D - d}{l_{\min}} \approx \frac{D - d}{l_{\min}}. \quad (3.3)$$

Kombinujući prethodne dve jednačine, dobija se granična vrednost ugaone greške:

$$\theta_{\max} = \frac{D - d}{\mu D} [\text{rad}]. \quad (3.4)$$

Maksimalna ugaona greška θ_{\max} pri kojoj je moguće uspešno uvlačenje jako zavisi od širine procepa $D-d$. Na primer, ako su $D=10$ mm, $D-d=0,01$ mm i $\mu=0,2$, tada je greška $\theta=0,29^\circ$. Ako se procep zbog varijacije d poveća na $D-d=0,05$ mm, tada je pri nepromenjenom μ dozvoljena ugaona greška znatno veća: $\theta_{\max}=1,43^\circ$.

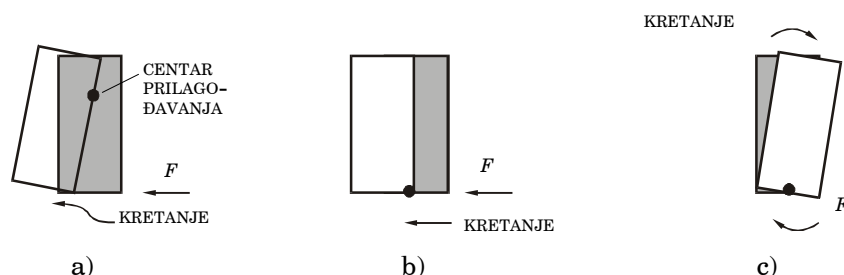
Eliminacija greški uvlačenja. Direktna eliminacija bočne i ugaone greške veoma je složena jer su neophodne informacije o većem broju parametara kao što su: toleransa sa kojom su radni predmeti poredani na mestu sa kojeg ih hvataljka uzima, dimenzione toleranse, promena dimenzija radnih elemenata zbog starenja i temperature i dr. Ovaj problem rešava se primenom hvataljki sa sensorizovanim elastičnim zglobom (koji ima izmaknuti centar prilagođavanja) ili primenom automatske kompenzacije greški (sa sensorima sile u povratnoj grani regulacione konture).

3.3. KLASIČNI SENZORI U ZGLOBU ŠAKE

3.3.1. Zglob sa pasivnim prilagođavanjem

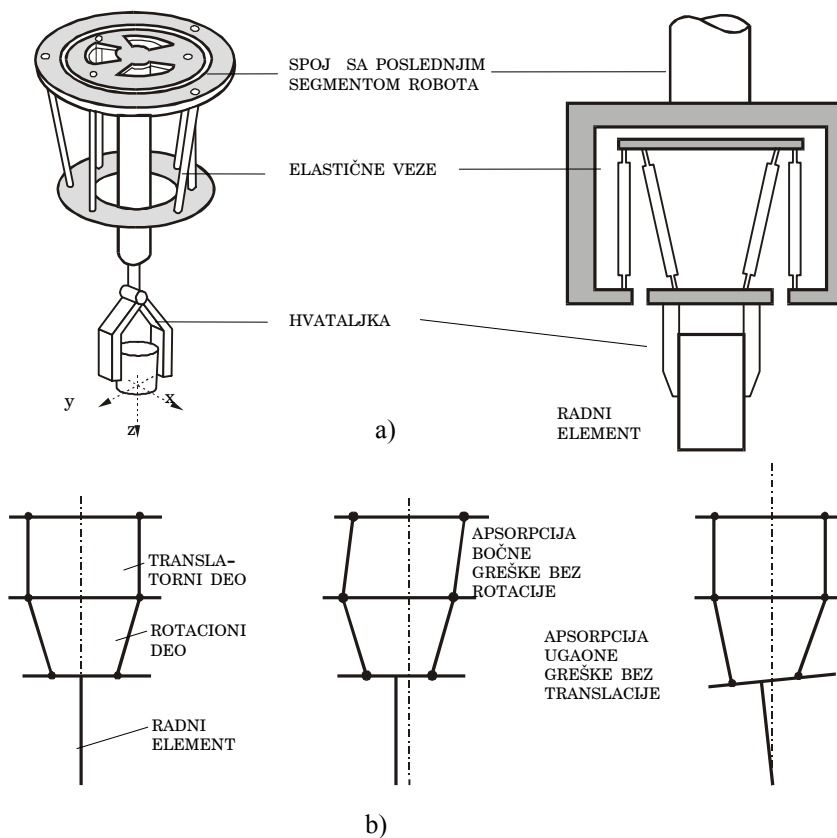
Pasivno prilagođavanje prvi put je primenjeno za merenje sile u zglobu robota 1976. godine (C.S.Draper Laboratory, USA). Uređaj na tom principu poznat je pod akronimom RCC (*Remote Center Compliance*). Kao što pokazuje jednačina (3.1), sila koja deluje na cilindar je vektor, pa je i rezultujuće pomeranje vektor, a veza između ova dva vektora je matrica elastičnosti (tj. inverzna matrica krutosti). Za mnoge slučajeve, kao što je, na primer, uvlačenje cilindra, postoji jedna tačka gde ova matrica postaje dijagonalna. Zbog toga sila koja deluje na cilindar izaziva samo njegovo čisto bočno (translatorno) kretanje, a moment koji deluje u toj tački izaziva samo rotaciju oko ose u toj tački. Ova tačka

označava se kao centar prilagođavanja (*Center Compliance*), a reč udaljeni (*Remote*) ističe da su translatorno i rotaciono kretanje u toj tački nezavisni i da je položaj tačke izvan cilindra. U praksi je konstrukcija RCC-a takva da je centar prilagođavanja na mestu kontakta, tj. na vrhu ili blizu vrha cilindra. Ako bi centar prilagođavanja bio iznad vrha cilindra, tada bi pod delovanjem bočne sile cilindar imao i translatorno i rotaciono kretanje (slika 3.3.a). Samo centar prilagođavanja na vrhu cilindra omogućava nezavisan odziv na silu i moment koji deluju u toj tački (slika 3.3. b,c).



Slika 3.3. Izmaknuti centar prilagođavanja: a) centar iznad vrha cilindra – složeno kretanje, b) centar u vrhu cilindra – bočno kretanje, c) centar u vrhu cilindra – rotaciono kretanje

Treba primetiti da RCC, zapravo, nije senzor, već mehanički uređaj koji omogućava nezavisnu apsorpciju ugaone i bočne greške. Može se zamisliti kao jedna višeosna opruga, postavljena između poslednjeg segmenta robota i hvataljke. Osnovna (generička) konstrukcija sastoji se od tri ploče. Prva je pričvršćena za poslednji segment robota, druga za hvataljku sa radnim komadom, a treća je između i spojena sa njima paralelnim i kosim elastičnim sponama (slika 3.4.a). Paralelne sponne omogućavaju deformaciju u obliku paralelograma, tj. bočno kretanje bez rotacije, kao odgovor na kontaktnu silu (slika 3.4.b). Na ovo kretanje delovanje momenta nema uticaja, tj. pomera se samo translatorni deo RCC-a dok rotacioni miruje. Ovaj slučaj javlja se u prvoj fazi uvlačenja kada cilindar klizi preko (zakošene) ivice otvora. Sponne čije se ose seku u centru prilagođavanja omogućavaju da srednja ploča zakrene oko centra pod delovanjem momenta i na to kretanje kontaktna sila nema uticaja, tako da se kreće samo rotacioni deo RCC-a dok translatorni miruje. Zato, kada na hvataljku sa cilindrom pri uvlačenju deluje kontaktna sila/moment, RCC se proporcionalno deformiše, bočno ili ugaono (tj. duž i oko osa x,y), tako da se postavi paralelno sa osom uklapanja.



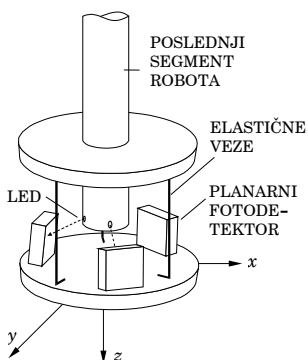
Slika 3.4. Izmaknuti centar prilagođavanja: a) konstrukcija i pojednostavljeni prikaz, b) apsorpcija bočne i ugaone greške

Defleksija RCC-a moguća je u svim pravcima osim duž radne ose, koja mora biti u vertikalnom položaju. Ako nije, RCC ima izvesnu deformaciju i kada nije opterećen, ali se ona može tretirati kao sistematska greška i jednostavno kompenzovati. Prednost RCC-a je pasivni način rada, a nedostatak složena konstrukcija prilagođena samo za određenu operaciju.

Tipični podaci za RCC su sledeći: maksimalna bočna greška koja se može apsorbovati (radni opseg) je $\pm 1-2$ mm (ugaona $\pm 1-3^\circ$), udaljenost izmaknutog centra od osnove je 10–150 mm sa toleransom 10–15%, bočna krutost je 10–30 N/mm (rotaciona 50–300 N/mrad). Kućište RCC-a je cilindrično, prečnika 10 cm i visine 5 cm.

3.3.2. Sensorizovani RCC

Konstrukcija. RCC je složen sistem sa šest stepeni slobode. Njegove defleksije duž i oko osa x, y, z prate se pomoću odgovarajućih senzora. Ovaj sensorizovani uređaj označava se kao IRCC (*Instrumented Remote Centre Compliance*). IRCC je takođe pasivan uređaj, ali izmerene deformacije omogućavaju kontroleru da proračuna kontaktne sile i preduzme adekvatniji odgovor. Kao senzori deformacije najviše se primenjuju tenzootporničke trake, optoelektronski detektori i linearni varijabilni diferencijalni transformatori LVDT. Broj senzora može biti i veći od šest, što zavisi od načina merenja i obrade mernih signala.



Slika 3.5. Sensorizovani RCC

Na slici 3.5 prikazan je IRCC sa tri infracrvene LED diode. Svakoj diodi pridružen je planarni fotoprijemnik sa matricom fotodioda. Osvetljena fotodioda označava poziciju svetlosnog zraka u ravni detektora. Putanja emitovane IC svetlosti zavisi od defleksije RCC-a. Tri opruge pomoću kojih RCC funkcioniše napravljene su od specijalnog elastomera. Ovim oprugama spojene su donja i gornja platforma konstrukcije, tako da donja platforma „pliva“ u odnosu na gornju. Elektronska kola u kućištu formiraju signale proporcionalne defleksijama

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ i $\Delta \theta_x, \Delta \theta_y, \Delta \theta_z$. Signali se šalju serijskom komunikacionom vezom do glavnog računara robota, gde se defleksije analiziraju i računa korekcija putanje robota. Metrološki pokazatelji opisanog IRCC-a na opsegu $\pm 2,5$ mm i $\pm 3,6^\circ$ su sledeći: osetljivost 0,0025 mm i 20", linearnost $\pm 5\%$ opsega i drift 0,05 mm/h.

Primena IRCC-a. Zavisno od interpretacije izlaza, IRCC se može tretirati kao senzor linearnog i ugaonog pomeraja ili kao senzor sile/momenta, zbog čega ima raznovrsnu primenu u asembliranju, proveru oblika i manipulaciji nad objektima.

Kod asembliranja razrađuje se posebna strategija približavanja elemenata. Za uvlačenje cilindra, na primer, često se primenjuje sledeća strategija:

- 1) spuštanje cilindra prema otvoru;
- 2) naginjanje (povlačenje) cilindra prema otvoru;

- 3) povlačenje cilindra preko otvora i detekcija kontakta sa suprotnom ivicom otvora;
- 4) neznatno vraćanje cilindra unazad;
- 5) povlačenje cilindra normalno na pravac iz prethodna dva koraka, i to u oba smera, detektovanje kontakata sa ivicama i pozicioniranje cilindra na sredini između kontakata;
- 6) ponovno povlačenje cilindra kao u koraku 3 sve dok se ne registruje kontakt;
- 7) uspravljanje cilindra u položaj približno paralelan radnoj osi;
- 8) guranje cilindra u ležište;
- 9) uvlačenje cilindra zahvaljujući pasivnom delovanju RCC-a ako su bočna i ugaona greška unutar definisanog opsega;
- 10) ako sila uklapanja prelazi definisani limit prije nego što je uvlačenje okončano, cilindar se malo pomeri da bi se detektovao moment na mestu kontakta, a zatim se koriguje nagib.

Realizacija algoritma odvija se pod nadzorom računara, pri čemu kompletiranje jedne etape traje oko 1 s. Kod manipulacije velikim objektima brzina kretanja robota mora biti takva da se robot može zaustaviti pre nego što defleksije RCC-a izađu iz definisanog opsega i, eventualno, dođe do njegovog oštećenja. Kretanje iz mirovanja i zaustavljanje moraju biti takvi da se jasno razlikuju signali ubrzanja od signala kontakta sa objektom.

3.3.3. Virtuelni RCC

Kretanje šake pod delovanjem kontaktne sile F opisuje se kao kretanje tela sa šest stepeni slobode:

$$M \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} + B \frac{d\mathbf{x}}{dt} = F - K(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0), \quad (3.5)$$

gde su: M matrica kolona masa, B matrica koeficijenata viskoznog trenja, K matrica koeficijenata krutosti opruga, \mathbf{x} vektor pozicije i orijentisanosti krutog tela i \mathbf{x}_0 ravnotežna tačka. Konvencionalni RCC konstruisan je tako da su vrednosti M , B i K u skladu sa zahtevima automatske operacije za koju je robot namenjen. Ovaj nedostatak može se prevazići softverskim postupkom: senzor u zglobu šake detektuje vanjsku silu F , na osnovu toga računaju se

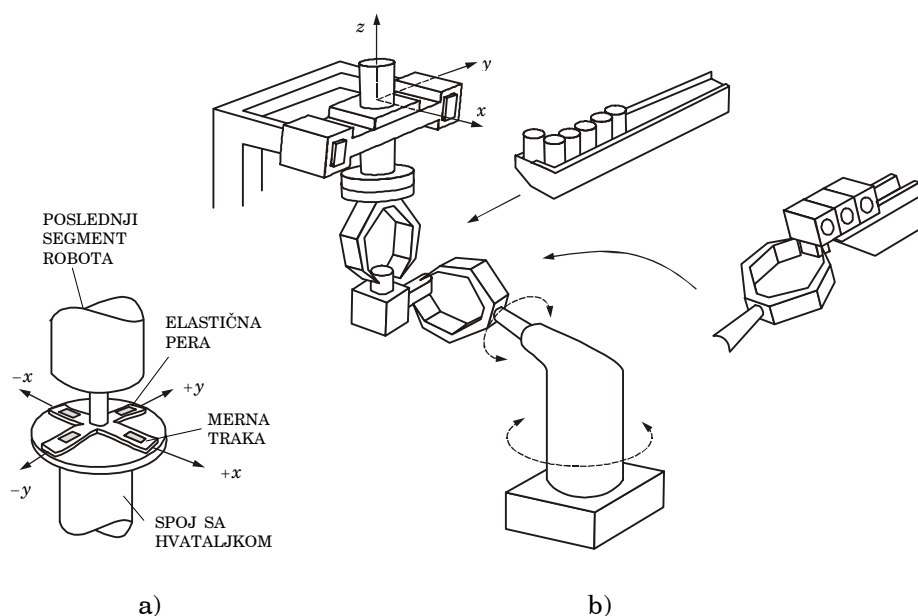
vrednosti $\mathbf{M}, \mathbf{B}, \mathbf{K}$ i podešavaju se adekvatno datoj operaciji, a onda odredi potrebna brzina kretanja šake iz jednačine (3.5):

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{M}^{-1} \int \left\{ \mathbf{F} - \mathbf{K}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_o) - \mathbf{B} \frac{d\mathbf{x}}{dt} \right\} dt, \quad (3.6)$$

koja služi kao referentna vrednost za servosistem automatskog upravljanja. Za praktičnu realizaciju virtuelnog prilagođavanja dovoljno je da matrica \mathbf{K} bude dijagonalna, da koeficijenti krutosti opruga duž i oko ose z imaju beskonačnu vrednost, a da se ostalim koeficijentima pridružuju izračunate konačne vrednosti.

3.3.4. Senzor sile u zglobu šake

Konstrukcija. Senzori ovoga tipa integrisani su u zglob šake. Senzor se sastoji od četiri unakrsna elastična pera koji su u tački ukrštanja fiksirani za poslednji segment robota, a na krajevima za donju platformu (slika 3.6.a). Na svakom peru nalazi se po jedna merna traka za detekciju deformacija duž osa x, y, z . Osnovna karakteristika ovog senzora su visoka osetljivost i funkcionalnost.



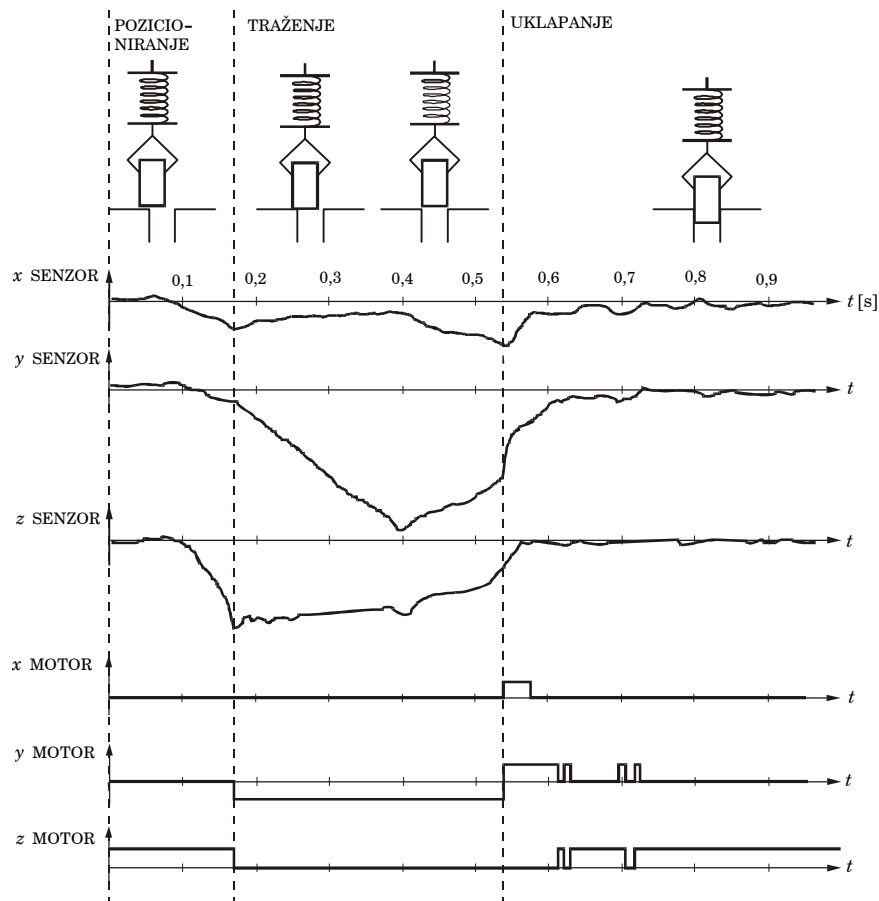
Slika 3.6. Fleksibilni zglob: a) konstrukcija, b) primena

Primena. Ovaj tip senzora omogućava primenu robota u asembliranju elemenata sa složenim uzajamnim položajima i strogim

toleransama uklapanja. Tipičan primer je uvlačenje cilindra. Pomoćni robot sa dva stepena slobode uzima sa određenog mesta element sa rupom i postavlja ga u radnu poziciju. Glavni robot ima tri stepena slobode i sa drugog mesta uzima cilindrični element i obavlja uklapanje (slika 3.6.b). (Ova kombinacija prvi put je realizovana pomoću Hitačijevog robota HI-T-HAND Expert 1, 1972.)

Algoritam uvlačenja cilindra za sistem od dva robota nastao je primenom bioinženjerskih metoda, tj. imitiranjem ljudske ruke pri uvlačenju. Osnovne operacije koje čovek provodi prilikom manuelnog uvlačenja su: pozicioniranje cilindra u blizini otvora pomoću čula vida, traženje otvora (uvlačenje vrha cilindra) zahvaljujući fleksibilnosti prstiju i uklapanje pomoću čula dodira. Ovaj algoritam realizuje se na datom sistemu pomoću mikroprocesorske regulacione konture sa opisanim senzorom u povratnoj grani i koračnim motorom kao izvršnim uređajem. Na slici 3.7 prikazani su izlazi senzora i koračnog motora duž osa x, y, z u toku izvršavanja algoritma:

- *Pozicioniranje* (približavanje) je prva etapa. Svodi se na spuštanje cilindra duž ose z sve dok kontaktna sila F_z ne dostigne zadatu vrednost.
- *Traganje* je druga etapa. Počinje povlačenjem cilindra duž ose y , pri čemu cilindar dobija, zahvaljujući fleksibilnosti zgloba, blagi nagib u odnosu na ravan xy . Zglob deluje kao sabijena opruga i u trenutku kada cilindar svojim vrhom naiđe na otvor ležišta, izlaz z -senzora pada na nulu.
- *Uklapanje* je treća etapa. Sastoji se u pokretanju cilindra duž osa x i y radi anuliranja nagiba cilindra iz prethodne etape. Sila uklapanja djeluje na cilindar duž ose z , a njen intenzitet povećava se kontrolisanim diskretnim iznosima, zavisno od delovanja bočnih sila xy koje sprečavaju ili, eventualno, otklanjaju zaglavljivanje.



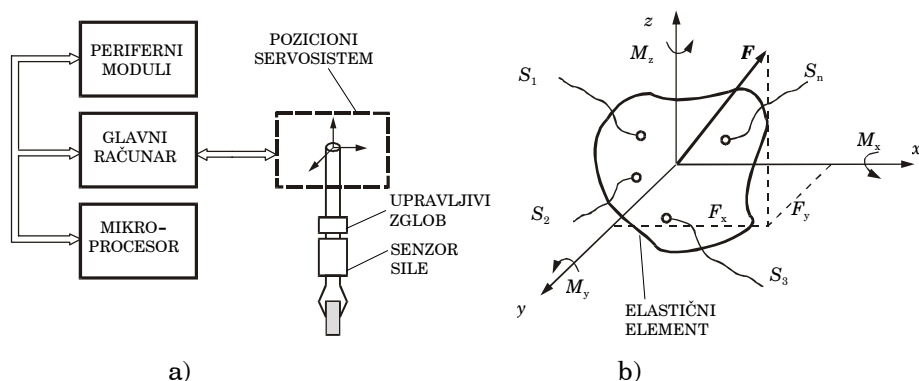
Slika 3.7. Oblici signala iz x,y,z senzora i x,y,z motora za vreme približavanja, traženja i uklapanja

3.4. KOMPAKTNI SENZORI SILE

3.4.1. Principi gradnje višekomponentnih senzora

Senzori sile i složene operacije. Istraživanja su pokazala da se i najsloženije operacije asembliranja mogu provesti pomoću relativno jednostavnih algoritama kada su elastični zglobovi i senzori napravljeni nezavisno, kao kompaktni uređaji. Upravljanje robotom

tada je hijerarhijski strukturirano. Grubo pravougaono x, y, z pozicioniranje, korekcije i kretanje u vezi sa neposrednim operacijama asembliranja (na primer, kretanje naniže radi uvlačenja) pripadaju višem hijerarhijskom nivou. Fine korekcije provode se na nižem hijerarhijskom nivou pomoću servoregulacione konture sa senzorom sile u povratnoj sprezi (slika 3.8.a). Izlazi senzora sile su informacije koje služe računaru za upravljanje zglobovima kao izvršnim uređajem. Senzor sa elastičnim perima predstavlja preteču ovakvog koncepta.



Slika 3.8. Višekomponentni senzor sile/momenta: a) senzor u sistemu automatskog asembliranja, b) princip višekomponentnog merenja

Određivanje kalibracione matrice. Merenje kontaktnih sila i momenata pri asembliranju nije lako. Razlog je što su u pitanju vektorske veličine i što se zbog osetljivih promena pravca i intenziteta postavljaju strogi zahtevi u pogledu statičke i dinamičke tačnosti određivanja komponenti duž i oko osa. Posebno je teško ispuniti zahtev za kompaktnom minijaturnom konstrukcijom senzora u kome se pomoću jednog elastičnog (deformacionog) elementa detektuju sve komponente sile i momenta. Elastični element ima različite, uglavnom složene oblike, a njegove deformacije mere se pomoću mernih traka, optičkih ili induktivnih senzora.

U opštem slučaju višekomponentni senzor sile ima šest stepeni slobode, odnosno meri tri komponente sile F_x, F_y, F_z i tri komponente momenta M_x, M_y, M_z (slika 3.8.b). Proporcionalno delovanju sile $\mathbf{F} = [F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]^T$ elastični element se deformiše:

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}\mathbf{D}, \quad (3.7)$$

gde je \mathbf{R} matrica $6 \times n$ koeficijenata krutosti elastičnog elementa, a \mathbf{D} matrica $n \times 1$ deformacije.

Na elastičnom elementu označena su mesta gde su postavljeni senzori deformacija sa električnim izlazima S_1, S_2, \dots, S_n . Njihov broj može biti i veći od šest, zavisno od oblika elastičnog elementa i načina obrade signala sa senzora. Delovanjem sile duž jedne ose dolazi do deformacije elastičnog elementa ne samo duž te nego i duž ostalih osa. Ove poprečne deformacije su sistematska greška merne metode čija je vrednost oko $\pm 1\%$ mernog opsega. Ako su senzori deformacije linearni tada je

$$\mathbf{S} = \mathbf{K}\mathbf{D}, \quad (3.8)$$

gde je \mathbf{K} kalibraciona matrica $n \times n$ koeficijenata statičkog prenosa (osetljivosti) senzora ustanovljenih kalibracijom.

Ako se izmerena deformacija \mathbf{D} iz jednačine (3.8) uvrsti u jednačinu (3.7), dobija se uobičajena matrična forma za silu:

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}\mathbf{K}^{-1}\mathbf{S} = \mathbf{P}\mathbf{S}, \quad (3.9)$$

gde je \mathbf{P} matrica $6 \times n$ kalibraciona matrica. U literaturi se ova matrica još označava i kao dekupljujuća jer opisuje veze za određivanje sile iz izlaznih signala. Prilikom određivanja matrice \mathbf{P} prvo se mora naći pseudoinverzna matrica \mathbf{P}^* tipa $n \times 6$, koja zadovoljava relaciju

$$\mathbf{P}^*\mathbf{P} = \mathbf{I}, \quad (3.10)$$

gde je \mathbf{I} jedinična matrica $n \times n$. Ako se jednačina (3.9) pomnoži sa \mathbf{P}^* , dobija se

$$\mathbf{P}^*\mathbf{F} = \mathbf{P}^*\mathbf{P}\mathbf{S} = \mathbf{I}\mathbf{S} = \mathbf{S}. \quad (3.11)$$

Elementi \mathbf{P}^* računaju se za i -tu vrstu ($i=1,2,\dots,n$) na osnovu kalibracionih podataka za F_k i S_k , pri čemu se za svaku vrstu dobija 6 jednačina:

$$P_{i1}^*F_{k1} + P_{i2}^*F_{k2} + \dots + P_{i6}^*F_{k6} = S_{ki}, \quad k=1,2,\dots,6. \quad (3.12)$$

Standardnim postupcima sistem linearnih jednačina (3.12) rešava se po nepoznatim P_{ij}^* . Kada se procedura ponovi za sve vrste, tj. $i=1,2,\dots,n$ puta, time je određena matrica \mathbf{P}^* . Na kraju, kalibraciona matrica \mathbf{P} je:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{P}^{*\mathbf{T}}\mathbf{P}^*)^{-1}\mathbf{P}^{*\mathbf{T}}. \quad (3.13)$$

U idealnom slučaju nema poprečnih veza i tada je \mathbf{P} dijagonalna matrica 6×6 . Poboljšanom konstrukcijom elastičnog

elementa, upotrebom kvalitetnih senzora deformacije i uz pomoć elektronskih kola za korekciju, nedijagonalni elementi mogu se učiniti samo približno jednakim nuli. Primena mikroprocesora daje brzu i tačnu korekciju za svaki izlaz i omogućava, ujedno, bolju distribuciju funkcija između mehaničkih i elektronskih komponenti senzora deformacije i procesiranja signala.

3.4.2. Šestokomponentni senzori sa mernim trakama

Merne trake se danas uspešno primenjuju za merenje deformacija u sensorima sile. Razlog je u savršenijim konstrukcijama elastičnog elementa, pa se relativno lako postiže modularnost. S druge strane, veoma dobro su razrađene tehnike dobijanja električnog signala pomoću mernih traka i pojačanje signala, konverzija u digitalni signal i prenos signala do kontrolera radi konačne obrade.

Kompaktni senzor sa analognim izlaznim stepenom. Na slici 3.9.a predstavljena je jedna od prvih kompaktnih konstrukcija, sa elastičnim sistemom iz dva dela i mernim trakama za merenje deformacije. Donji deo je šuplja cilindrična osovina 2 koja je jednim krajem spojena za hvataljku robota, a drugim krajem za sredinu kućišta. Delovanje sile $F(F_x, F_y, F_z)$ i momenta $M(M_x, M_y, M_z)$ prenosi se sa hvataljke na osovinu. Na osovini je most sa mernim trakama zalepljen pod uglom od 45° u odnosu na osu osovine i služi za merenje torzionog momenta M_z . U preseku B–B', na rastojanju a od osnove senzora, zalepljena su dva tenzootpornička polumosta pomoću kojih se mere momenti oko osa x i y :

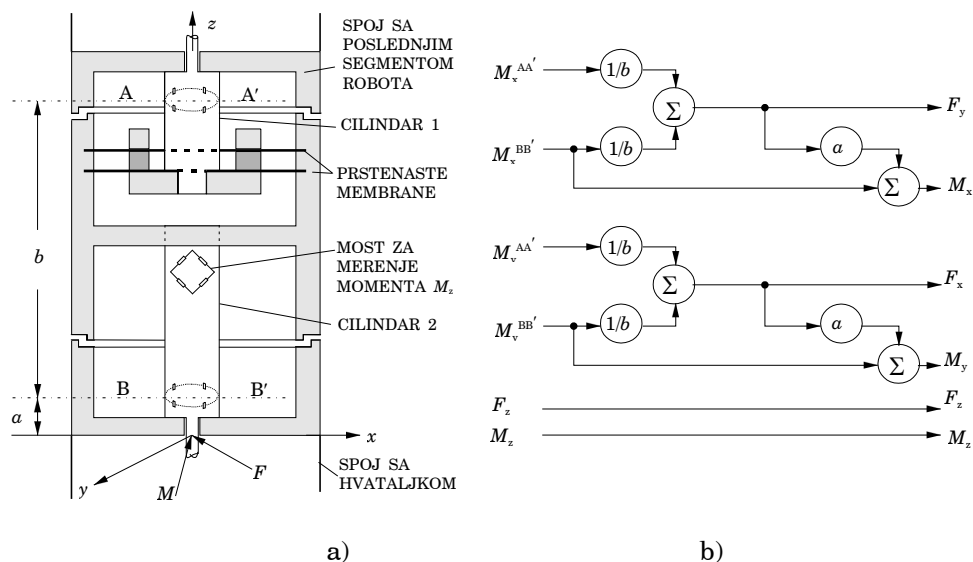
$$\begin{aligned} M_x^{BB'} &= F_y \cdot a + M_x \\ M_y^{BB'} &= F_x \cdot a + M_y. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Gornja polovina elastičnog sistema ima šuplji cilindar 1 koji je spojen sa poslednjim segmentom robota, a na sredini i donjem kraju ovešen o elastične prstenaste membrane. Progib membrane proporcionalan je sili F_x i meri se takođe mernim trakama. U

preseku A–A' na udaljenosti $a+b$ od osnove pomoću dva polumosta od mernih traka, slično kao u preseku B–B', mere se momenti

$$\begin{aligned} M_x^{AA'} &= F_y \cdot (a + b) + M_x \\ M_y^{AA'} &= F_x \cdot (a + b) + M_y. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Jednostavnim analognim kolom rešava se sistem jednačina (3.14) i (3.15) i određuju komponente vektora \mathbf{F} (slika 3.9.b). U nedostatku savremenijih digitalnih tehnika obrade signala ova osobina dugo je bila glavna prednost opisanog senzora. Tehničke karakteristike su: merni opseg za silu je od -20 N do $+20$ N, a za moment od -1 Nm do $+1$ Nm, visina je 100 mm, prečnik je 80 mm, a prirodna frekvencija je 35 Hz.



Slika 3.9. Šestokomponentni senzor sile i momenta; a) konstrukcija, b) analogna šema za dobijanje komponenti \mathbf{F} i \mathbf{M}

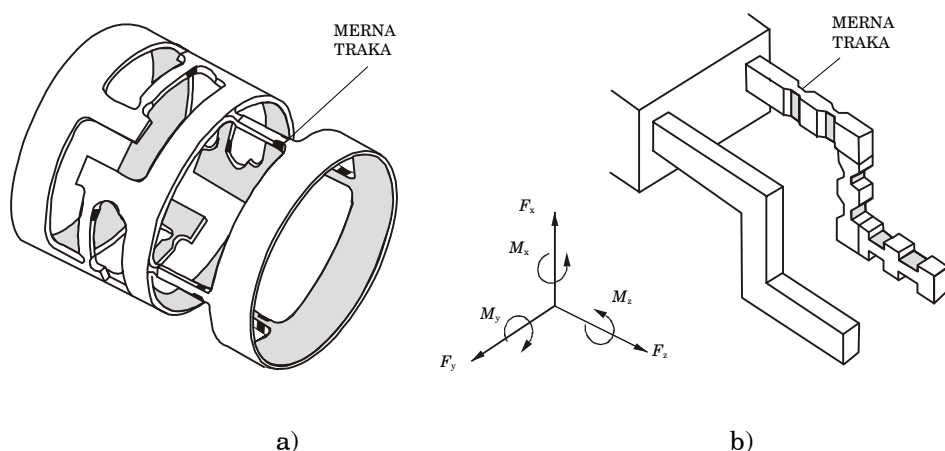
Kompaktni senzor sa digitalnim izlaznim stepenom prikazan na slici 3.10.a ima specijalno profilisan šuplji cilindar kao elastični element. Cilindar je prečnika 5–7 cm, sa četiri uzdužna i četiri poprečna elastična pera osetljiva na uzdužnu, odnosno poprečnu deformaciju cilindra. Na svakom peru su po dve merne trake koje mere lokalnu deformaciju istog intenziteta, a suprotnog znaka. Trake su obično povezane seriju, u tzv. potencijometrijsku šemu i tada je izlazni signal:

$$U_i = \frac{R + \Delta R}{2R} U_{\text{ref}}, \quad (3.16)$$

ili u polumost, pa je tada izlazni signal direktno proporcionalan promeni otpornosti, odnosno merenoj deformaciji:

$$U_i = \left(\frac{R + \Delta R}{2R} U_{\text{ref}} - \frac{1}{2} U_{\text{ref}} \right) = \frac{\Delta R}{2R} U_{\text{ref}}. \quad (3.17)$$

Dva puta veća osetljivost dobija se pomoću Vitstonovog mosta u kome su spojene četiri merne trake, ali je takva šema skuplja.

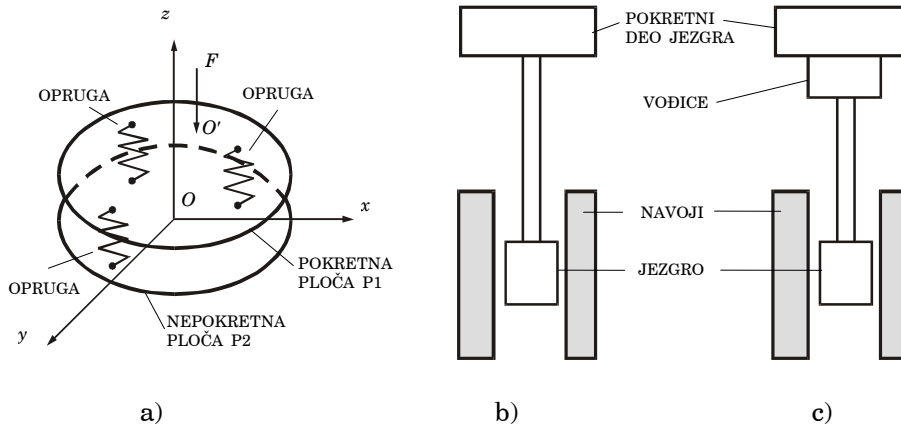


Slika 3.10. Senzori sa mernim trakama: a) sa cilindričnim elastičnim elementom, b) sa modularnom konstrukcijom

Modularni senzor sa mernim trakama na slici 3.10.b ima jednostavnu i elegantnu konstrukciju. Svakoj osi pridružen je po jedan modul čija se deformacija meri pomoću četiri merne trake spojene u puni most. Lokacija i orijentacija modula unutar zgloba podešena je tako da se detektuju sve tri komponente sile i sve tri komponente mometa. Izlaz svakog mosta priključen je na instrumentacioni pojačavač, a zatim preko multipleksera na A/D pretvarač. Tu se formira digitalna informacija na osnovu koje kontroler robota prati interakciju sa okolinom i upravlja operacijom.

3.4.3. Induktivni šestokomponentni senzori

Induktivni senzor sile odlikuje se jednostavnošću konstrukcije. Elastični sistem sastoji se od nepokretne ploče P2 spojene sa poslednjim segmentom robota, od pokretne loče P1 spojene sa hvataljkom robota i od triju opruga između ploča (slika 3.11.a). Kada sila F deluje na ploču P1 u tački O duž ose z , elastični sistem se deformiše i ploča P1 pomeri za D , pa je $F=RD$. Pri tome su koeficijenti krutosti r_{ij} elastičnog sistema određeni u odnosu na koordinatni sistem $Oxyz$.



Slika 3.11. Induktivni senzor sile: a) princip rada, b) ugradnja bez vodica, c) ugradnja sa vodicama

Pomeraj D ne meri se u tački O već u tačkama O_k , $k=1,2,\dots,6$. Na svakoj poziciji k ugrađen je jedan induktivni senzor, čiji je izlazni signal proporcionalan deformaciji d_k duž pravca po kome se kreće jezgro senzora, tako da je

$$[s_1, s_2, \dots, s_6]^T = \mathbf{K}[d_1, d_2, \dots, d_6]^T, \quad (3.18)$$

odnosno:

$$[F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]^T = \mathbf{R}\mathbf{K}^{-1}[s_1, s_2, \dots, s_6]^T, \quad (3.19)$$

pri čemu se elementi matrice pseudoelastičnosti $\mathbf{P}=\mathbf{R}\mathbf{K}^{-1}$, kako je ranije objašnjeno, određuju kalibracijom.

Prednost ovakvog višekomponentnog senzora sile su jednostavna konstrukcija elastičnog sistema i primena standardnih linearnih induktivnih senzora za detekciju pomeraja. Obično se

stavlja induktivni senzor cilindričnog tipa jer nije osjetljiv na bočno kretanje jezgra (slika 3.11.b). Ukoliko je potrebno, ugrađuju se posebne vođice koje dozvoljavaju samo vertikalno kretanje jezgra, ali tada rastu trenje i histerezis senzora (slika 3.11.c). Osnovni tehnički pokazatelji ovog šestokomponentnog senzora sile su: opseg ± 20 N, rezolucija 0,1 N, linearnost 3%, izdržljivost na udare, modularnost i kompaktnost konstrukcije, dostupnost i laka zamena delova.

3.5. SENZORI SILE NA PRSTIMA

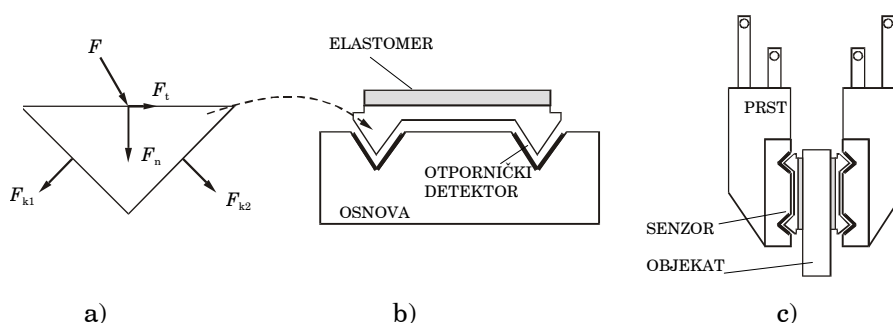
Hvataljka i radni predmet kod čvrstog kontakta ponašaju se kao jedinstveno kruto telo, tj. nema klizanja predmeta. Pri tome hvataljka slabo drži predmet i tada nastaju male male kontaktne sile ili ga držati suviše čvrsto, pa nastaju velike kontaktne sile. Zbog toga tačnost kretanja hvataljke u smislu dostizanja potrebne pozicije i orijentacije mora da bude usklađena sa dimenzionim toleransama asembliranog komada. Za adekvatno dražnje i uspešnu realizaciju kontaktnog zadatka neophodni su senzori sile na prstima šake. Njihove glavne osobine su izvanredna osjetljivost, velika brzina odziva i elastičan površinski sloj koji se deformiše u kontaktu sa predmetom. Merenjem deformacije tog sloja dolazi se do informaciji o kontaktnim silama.

Dvokomponentni senzor sile namenski je razvijen za ugradnju na prste robota. Osnovni element senzora je od čvrstog materijala i ima oblik trougaone prizme (slika 3.12.a). Dve ovakve prizme smeštene su na prstu na rastojanju l u udubljenje istog prizmatičnog oblika i spojene pločicom od istog materijala preko koje je postavljen elastični sloj (slika 3.12.b). Deformacija sloja prenosi se preko pločice na trougaone prizme ispod kojih su smešteni otpornički detektori koji mere normalnu komponentu sile. Na svakom prstu nalazi se jedan dvodimenzionalni senzor sile (slika 3.12.c).

Kada na prizmu deluje sila F_1 , odnosno njena normalna komponenta F_n i njena tangencijalna komponenta F_t , tada otpornički senzori ispod prizme mere normalne komponente kontaktne sile F_{k1} i F_{k2} . Vrednosti za F_n i F_t računaju se pomoću jednostavnih formula:

$$F_t = \frac{\sqrt{2}}{2} (F_{k2} - F_{k1}), \quad (3.20)$$

$$F_n = \frac{\sqrt{2}}{2} (F_{k2} + F_{k1}). \quad (3.21)$$



Slika 3.12. Dvokomponentni senzor sile: a) osetilni element, b) struktura senzora, c) ugradnja senzora na prstima hvataljke

Ukupna tangencijalna sila za celi senzor je

$$F_t^{\text{uk}} = F_t^1 + F_t^2, \quad (3.22)$$

a ukupna normalna sila je

$$F_n^{\text{uk}} = F_n^1 + F_n^2. \quad (3.23)$$

Napadna tačka ukupne normalne sile određuje se iz odnosa:

$$x = l \frac{F_n^2}{F_n^1 + F_n^2}. \quad (3.24)$$

Kada nema bočne sile, tada je napadna tačka na sredini rastojanja između dve prizme: $x=l/2$. Kada postoji bočna sila, tada se napadna tačka pomera na jednom prstu iznad centra, a na drugom ispod centra. Na prstima hvataljke postavljen je po jedan senzor, tako da je moguće meriti kontaktne sile (stezanja) duž ose senzora, ukupnu silu uvlačenja duž ose objekta sile, a na osnovu informacije

o mestima napadnih tačaka na oba senzora mogu se odrediti smer i veličina nagiba objekta u hvataljci zbog delovanja bočne sile.

3.6. SENZORI SILE IZVAN ROBOTA

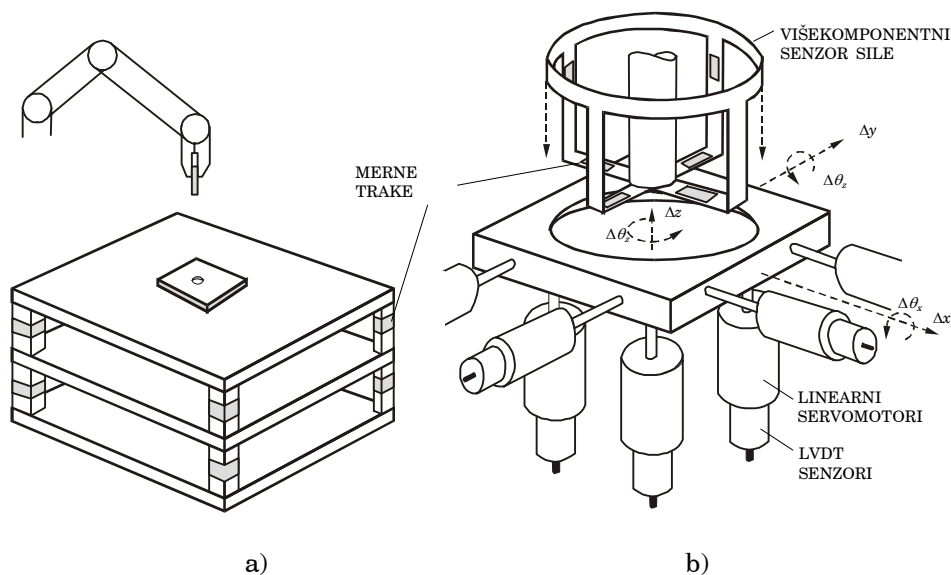
Princip rada zasniva se na činjenici da se umesto sile kojom robot deluje na predmet može meriti sila reakcije kojom predmet deluje na robota. U tom slučaju radni predmet je pričvršćen na podlozi, tako da se delovanje sile sa predmeta prenosi na podlogu, a na osnovu deformacije podloge računaju se kontaktne sile i momenti. Ovakva podloga obično se naziva senzORIZOVANI radni sto. Senzorizovani sto najčešće je opremljen mernim trakama kao najpogodnijim elementima za detekciju deformacije.

Standardna konstrukcija senzorskog stola ima tri horizontalne ploče povezane na čoškovima sa elastičnim štapovima (slika 3.13.a). Merne trake na štapovima između gornje i srednje ploče spojene su u puni Vitstonov most, a orijentisane su da mere uzdužnu komponentu sile. Merne trake na štapovima između srednje i donje ploče mere poprečnu silu. Za jednostavnije operacije ovakav senzorski sto je solidno rešenje, ali dobijene informacije su nedovoljne za potpuno određivanje svih komponenti sile i momenta kod složenijih operacija.

Složeniju konstrukciju ima specijalni radni sto koji se sastoji od šestokomponentnog senzora sile i preciznog uređaja za fino pomeranje duž osa $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ i oko osa $\Delta \theta_x, \Delta \theta_y, \Delta \theta_z$ (slika 3.13.b). Ovakav radni sto primenjuje se u sistemima gde pomoćni robot prinosi jedan element asembliranja drugome koji stoji na senzorskom stolu. Pomoćni robot može da se kreće po pravougaonoj putanji duž osa x, y, z i da rotira oko osa x, y . Detekcija kontaktne sile i fino pomeranje senzorskog stola omogućavaju uspešno asembliranje.

Deo senzorskog stola koji identifikuje silu ima ram od elastičnih čeličnih traka na kojima je zalepljeno osam mernih traka. Merne trake su spojene u četvrtinske mostove sa električnim izlazima S_1, S_2, \dots, S_8 . U odnosu na koordinatni sistem $Oxyz$ komponente sile i momenata računaju se pomoću jednačine $F=PS$, gde je P kalibraciona (deklupujuća) matrica sa elementima koji

opisuju veze između komponenata sile F_i i senzorskih izlaza S_i . Za silu je opseg ± 20 N i osetljivost 0,01 N, a za moment je opseg $\pm 0,1$ Nm i osetljivost 0,002 Nm.



Slika 3.13. Senzorski sto: a) standardna konstrukcija, b) specijalna konstrukcija

Pomoću linearnih servomotora senzorski sto pomera se duž osa x, y, z (opseg ± 3 mm, rezolucija 2 mm) i oko osa (opseg $\pm 2^\circ$, rezolucija $5''$). Informaciju o ovim pomerajima daju LVDT senzori. Izvršeno pomeranje odgovara translaciji i rotaciji koordinatnog sistema $Oxyz$ u koordinatni sistem $Oxyz'$, pa je za izračunavanje komponenti sile neophodno modifikovati jednačinu (10.3) sa matricom transformacije $Oxyz$ u $Oxyz'$.

Operacije asembliranja provode se koordinacijom rada pozicionog robota i senzorskog stola. Kada je u pitanju uvlačenje cilindra u rupu, na primer, koordinacija se ogleda u određivanju parametara tekućeg uvlačenja na osnovu prethodnih asembliranja. Strategija uvlačenja sastoji se u održavanju bočne sile i bočnog momenta na što manjoj vrednosti i održavanju vertikalne sile u pravcu uvlačenja na nekoj vrednosti unutar definisanog opsega. Na taj način, nakon završenog uvlačenja, sila i moment između asembliranih elemenata imaće minimalne vrednosti, pa će uzajamni položaj pozicionog robota i senzorskog stola tada najtačnije

identifikovati centar otvora ležišta i nagib cilindra. Na osnovu niza prethodnih uvlačenja vrši se statistička procena ova dva parametra i time znatno skraćuje vreme potrebno za naredno uvlačenje.

LITERATURA

1. K.Sugimoto: „Present state and trends in robot technology“, *Robotics*, Vol. 3, No. 1 (81–86), 1987.
2. M.W.Schmidt: „Compliant robotic assembly boots speed and flexibility“, *Robotics*, Vol. 7, No. 1 (25–28), 1989.
3. R.H. Sturges: „A quantification of machine dexterity applied to an assembly task“, *The Int. Journal of Rob. Res.*, Vol. 4, No. 2 (88–102), 1991.
4. R.H.V.Turou: „A model for a control and monitoring system for an autonomous mobile robot“, *Robotics*, Vol. 4, No. 1 (41–47), 1988.
5. A.S.Fiorillo, P.Dario, M.Bergamasco: „A sensorized robot gripper“, *Robotics*, Vol. 4, No. 1 (49–55), 1988.
6. A.Pugh (ed): „*Robot sensors. Vol.2 – Tactile and non-vision*“, IFS (Publications) Ltd., Bedford and Springer-Verlag, Berlin, 1986.
7. J.Lee: „Apply force/torque sensors to robotic applications“, *Robotics*, Vol. 3, No. 2 (189–194), 1987.
8. M.Popović: „*Senzori i merenja*“, Viša elektrotehnička škola, Beograd, 1994.
9. J.W.Cook: „Applying sensors to automatic assembly systems“, *IEEE Trans. on Industry Application*, Vol. 27, No. 2 (282–286), 1991.
10. I.Plander: „Trends in the development of sensor systems and their use in some technological areas“, *Robotics*, Vol. 3, No. 2 (157–165), 1987.
11. C.Wu: „Compliance control of a robot manipulator based on joint torque servo“, *The Int. J. Rob. Research*, Vol. 4, No. 3 (55–71), 1985.
12. M.Bergamasco, F.Salsedo, P.Dario: „Shape memory alloy micromotors for directdrive actuation of dexterous artificial hands“, *Sensors and Actuators A*, Vol. 17, Nos. 1&2 (115–119), 1989.
13. S.R.Ruocco: „*Robot sensors and transducers*“, Halsted Press, John Wiley & Sons, 1987.
14. A.C.Staugaard: „*Robotics and AI. An introduction to applied machine intelligence*“, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1987.
15. R.C.Dorf: „*International encyclopedia of robotics*“, John Wiley & Sons, N.Y., 1988.
16. J.M.Bren: „Force sensing or vision: weighing the advantages“, *Robotics Today*, april 1985.

-
17. Š.Havlik: „Modeling, analysis and optimal design of multicomponent force/displacement sensors“, *The First ECPD Int. Conf. on Advanced and Intelligent Automation*, pp. 283–288, Athens, 1995.
 18. B.Borovac, L.Nagy: „New design of two–component force sensor for contact sensing“, *The First ECPD Int. Conf. on Advanced and Intelligent Automation*, pp. 265–270, Athens, 1995.

TAKTILNI SENZORI

4.1. PRINCIPI GRADNJE

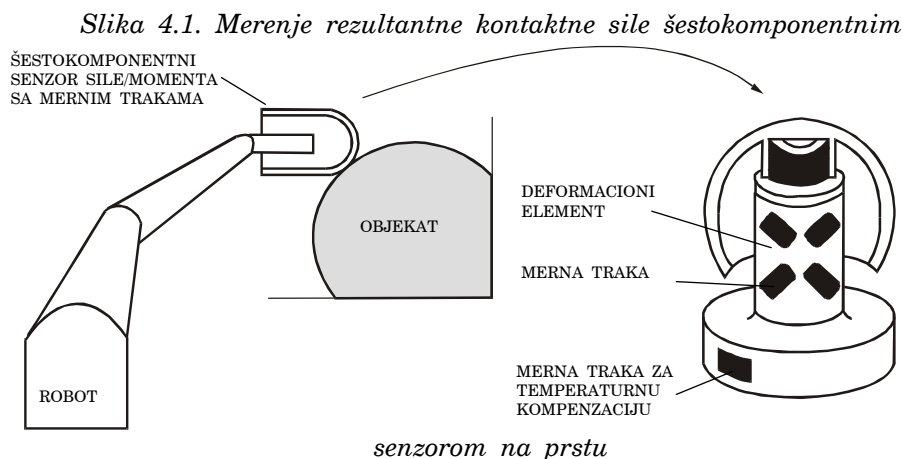
4.1.1. Taktilna percepcija

Površinski kontakt. Senzori mere aktuelne vrednosti fizičkih veličina radne okoline robota, što omogućava robotu da adekvatno deluje na okolinu. Taktilna (dodirna) percepcija daje informacije o poziciji i orijentaciji objekata, njihovim mehaničkim svojstvima (težina, elastičnost, plastičnost) i fizičkim stanjima (vlažnost, temperatura). Kada robot drži neki objekat, u najprostijem slučaju samo sa dva prsta, mesto kontakta je tačka, linija ili površina. Kontaktna sila je rezultanta težine objekta i sile sa kojom robot deluje na objekat. Ona ima komponentu normalnu na ravan dodira (normalne sile) i komponente u ravni dodira (tangencijalne sile, tj. sile trenja), pri čemu komponente u ravni formiraju moment uvrtnja (torzije) i/ili klizanja (smicanja).

Ako se mere samo rezultatna delovanja sile i momenta duž kontaktne linije ili površine, taktilni senzor može da se napravi kao minijaturni šestokomponentni senzor sile i momenta montiran na vrhu prsta, na izvesnom odstojanju od površine dodira (slika 4.1). Da se odredi distribucija sile na mestu dodira, neophodno je da se unose male distorbacije i prate sukcesivni odzivi senzora, čime se realizuje tzv. aktivna percepcija.

Pasivna i aktivna percepcija. Senzor sile i momenta ima posebno profilisan elastični element i detektor deformacije. Izlazne informacije sa detektora su vrednosti komponenti kontaktne sile i lokacija delovanja sile (obično data u odnosu na kontaktni centroid – referentnu tačku koja leži unutar najmanjeg konveksnog dela prsta). Prema tome, taktilni senzor ovoga tipa meri silu i moment u jednoj tački i na taj način može jedino da potvrdi da je objekat prisutan ili ne, odnosno primenom aktivne percepcije meri sile i momente na

celoj liniji ili površini dodira. Primena ovih senzora prevashodno dolazi do izražaja kada se manipuliše većim objektima i silama.



Senzorski niz ili matrica. Kada se između prstiju robota vrši neka manipulacija objektom, neophodno je detaljno praćenje svih sila (distribucija, pravac, smer, intenzitet) u tačkama kontakta. Vizisenzori su ovde od male koristi jer prsti onemogućavaju slobodan pogled na objekt; njihova efikasnost dolazi do izražaja pre i posle operacije kada se mere veličine u vezi sa oblikom i orijentacijom objekta. Taktilna percepcija pri manipulaciji sa objektom odnosi se na mogućnost lokacije dodirnih površina, tj. oblika objekta, pomoću detekcije kontaktnih sila i momenata koji su odraz dinamike objekta tokom manipulacije.

Za realizaciju takvog zahteva neophodni su senzori poredani u niz ili matricu. Na osnovu jednog kontakta sa objektom dobijaju se određene informacije o obliku objekta, pri čemu se uzima u obzir relativni položaj senzora u odnosu na koordinatni početak vezan za šaku robota. Potpune informacije o obliku mogu se dobiti jedino aktivnom percepcijom, tj. novim kontaktima posle malog pomeranja šake. Prsti šake opremljeni sensorima dodira obično se pomeraju nezavisno, pa se na taj način detektuju lokalne sile dodira i određuju karakteristike objekta.

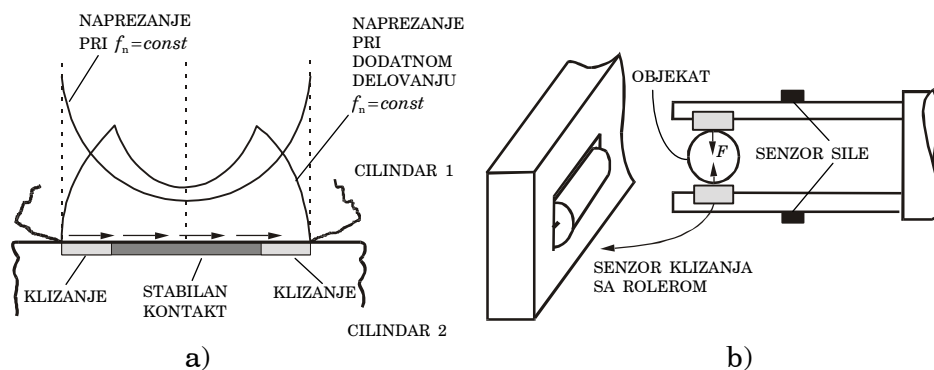
Definicija. U skladu sa prethodnim razmatranjem, taktilna percepcija definiše se kao kontinualna detekcija kontaktnih sila pri dodiru na određenoj površini i sa definisanom prostornom rezolucijom. Kao rezultat nastaje 2D-slika koja se označava taktilnom ili kontaktnom vizijom. Potpuna informacija o obliku

predmeta, tj. 3D-slika, može se dobiti samo aktivnom percepcijom ili procesiranjem više 2D-slika sa različitim dodirnih površina. Merenje sile u nizu tačaka – taktela (*tactile + element*) – znatno se razlikuje od merenja sile u samo jednoj tački.

Klizanje je specifična kontaktna pojava koja se manifestuje kao kretanje objekta između prstiju robota. Detekcija i kontrola klizanja neophodni su za delikatnije operacije nad objektima, tj. za pouzdano i stabilno držanje objekata. U prostijim slučajevima granica klizanja obično se određuje polazeći od pretpostavke da je trenje zbog smicanja i torzije proporcionalno normalnoj sili:

$$f_t + A|m_n| \leq \mu|f_n| \quad (4.1)$$

gde su f_t i f_n tangencijalna i normalna kontaktna sila [N], m_n moment torzije [Nm], μ koeficijent trenja i A koeficijent proporcionalnosti između smicanja i torzije (predstavlja se kao funkcija poluprečnika r kontaktne površine).



Slika 4.2. Klizanje: a) raspored površinskog naprezanja pri normalnom i dodatnom tangencijalnom delovanju kod koaksijalnog dodira dva cilindra, b) jednostavni senzor klizanja

Međutim, u složenijim slučajevima odnos normalne sile i sile smicanja dinamički je promenljiv, pa se jednačina (4.1) ne može primeniti. Ilustrativan primer je koaksijalni kontakt dva cilindra (slika 4.2.a). Kada deluje samo normalna sila f_n , površinska adhezija usmerena je radijalno prema periferiji kontakta, a kada se na normalnu silu superponira tangencijalna sila, tada se javlja i tangencijalna površinska adhezija koja po obodu kontakta (gde je tangencijalno trenje veće od normalne sile) uslovljava mikroklizanje.

Sa povećanjem tangencijalnog trenja, pri $f_n = const$, doći će do širenja zone klizanja prema središtu gde deluje radijalna adhezija. Proces se nastavlja sve dok klizanje ne nadvlada i tada objekat prokliže.

Za stabilan zahvat i kontrolu klizanja tokom manipulacije objektom neophodan je taktilni senzor koji razlikuje (nezavisno detektuje) normalne sile i sile smicanja. Ovo se može uraditi na dva načina:

- ugradnjom senzora klizanja koji će se pomerati proporcionalno klizanju objekta (slika 4.2.b);
- primenom programa za poređenje taktilnih slika dobijenih sa senzorskog niza ili matrice u određenim vremenskim intervalima.

Prvi način je jednostavniji. Osnovni nedostatak drugog načina je u složenosti programa za analizu slike, zbog čega vreme potrebno za proračun može da bude dosta veliko – toliko da objekat isklizne pre nego što je analiza završena.

Interpretacija taktilne informacije. Izlazni signali taktilnog senzora proporcionalni su silama i defleksijama nastalim zbog kontaktnog delovanja, pa se mogu interpretirati kao sledeća svojstva objekta i uslova kontakta:

- prisustvo objekta;
- oblik, lokacija i orijentacija objekta;
- sila (pritisak) na kontaktnoj površini i distribucija sile (pritiska);
- intenzitet, smer i mesto delovanja sile;
- statički i dinamički uslovi kontaktne površine;
- viskozno–elastična svojstva objekta.

4.1.2. Realizacija taktilne percepcije

Tehnički zahtevi koji se odnose na taktilne senzore složeniji su nego kod običnih senzora sile. Razlozi su u karakteru taktilne informacije. U opštem slučaju zahteva se da taktilni senzor što više liči na ljudsku kožu (distribuiranost na tankoj i fleksibilnoj osnovi), da struktura na koju se ugrađuje senzor što više liči na ljudsku šaku

(sa fleksibilnim i osetljivim prstima) i da se što veći obim procesiranja taktilne informacije obavi na nivou senzora. Iz ovoga se izvodi sledeća lista tehničkih zahteva:

- elastičan i izdržljiv površinski sloj senzora;
- prostorna rezolucija 1–2 mm za objekte veće od 10 cm, a za manje objekte i delikatnije manipulacije prostorna rezolucija treba da je manja od 1 mm;
- ukupan broj taktela 50–200, složenih u matricu $5 \times 10 - 10 \times 20$;
- linearne, stabilne i ponovljive statičke karakteristike sa malim histerezisom i driftom za svaki taktel;
- vremenske konstante taktela 1–10 ms;
- osetljivost na silu 0,01 N (oko 1 g), odnosno osetljivost na pritisak 30 Pa;
- dinamički opseg, tj. odnos između maksimalne i minimalne vrednosti mernog opsega treba da je 1000:1, što znači da senzor oseća sile do 10 N (oko 1 kg) i pritisak do 3 000 Pa;
- nezavisan elektronski sklop za obadu signala.

Da bi se dobila potpuna slika distribuirane pobude na kontaktnoj površini, poželjna je visoka prostorna rezolucija koja je ograničena veličinom senzora i njihovom interferencijom. Prema dosadašnjim saznanjima razmak između senzora treba da je manji od dvostruke dubine $2d$ na kojoj su senzori ugrađeni ispod površine kože. Minimalni razmak na koži za koji se detektuju dve nezavisne pobude tada je približno jednak d . Na primer, čovek na vrhovima prstiju razlikuje dodir dve igle kada su one na rastojanju većem od 1 mm.

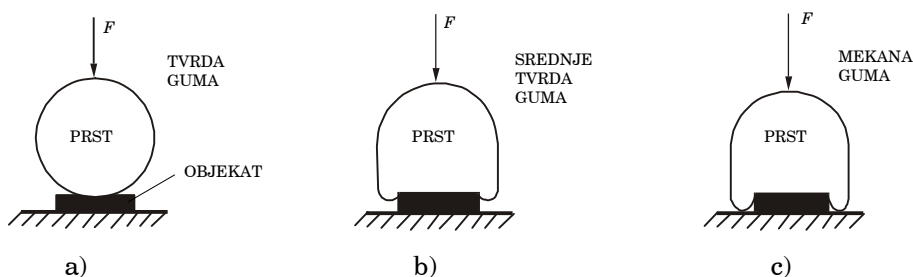
Struktura taktilnih senzora. Taktilni senzori sastoje se od tri osnovna dela:

1. *Veštačke kože*, čija je funkcija da pretvori vanjsku silu u mehanički pomeraj i da zaštiti konstrukciju od oštećenja i vanjskog uticaja;
2. *Senzora*, kao osetilnog elementa pridruženog jednom taktelu, koji pretvara mehanički pomeraj u proporcionalni električni signal. Prema fizičkom principu na kojem se zasniva pretvaranje taktilni senzori dobijaju ime: otpornički, kapacitivni, induktivni, optoelektronski, pijezelektrični i dr.

Zapravo, gotovo svi načini detekcije pomeraja poznati u tehničkoj praksi isprobani su, sa većim ili manjim uspehom, u realizaciji taktela;

3. *Elektronskog sklopa*, koji obrađuje signale sa senzora i interpretira ih radi dobijanja slike objekta.

Veštačka koža od elastomera, tj. od prirodne ili veštačke gume, pogodna je za formiranje površinskog sloja za taktilne senzore. Tvrdā guma razvija veće kontaktno naprezanje, daje malu kontaktnu površinu – nedovoljnu za detekciju objekta bez pokretanja prsta, tj. bez aktivnog dodira (slika 4.3.a). Njena dobra osobina je izdržljivost na vanjska oštećenja. S druge strane, suviše mekana guma slabo prenosi naprezanje, pa se može desiti da naprezanje gume oko objekta bude veće nego u smeru delovanja merene sile (slika 4.3.c). Najpovoljnija elastičnost veštačke kože bira se u skladu sa opsegom kontaktne sile i najmanjom veličinom kontaktne površine koja je od interesa (slika 4.3.b). Kod čoveka, na primer, koža na vrhovima prstiju ima takvu elastičnost da se vrlo malo deformiše kada se dodiruju sitne granule na glatkoj površini, ali dobro prenosi naprezanja, tako da se detektuje prisustvo granula sa prečnikom manjim od 20 μm .

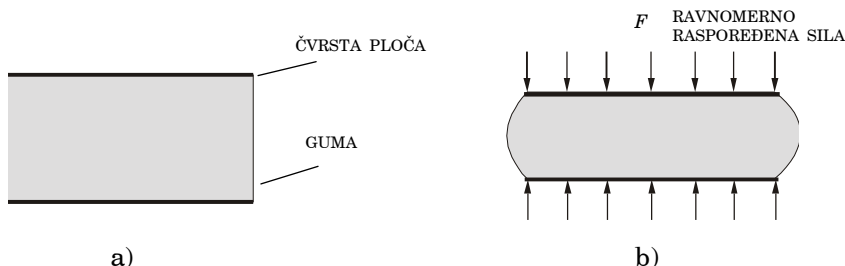


Slika 4.3. Kontakt sa kožom različite tvrdoće

Guma se ponaša kao nestišljiv fluid jer njena zapremina ostaje konstantna prilikom deformacije – može se sabiti do jedne trećine u odnosu na nenapregnuto stanje, a da ne dođe do njene degradacije. Kada se komadić gume između dveju čvrstih ploča površine S pritisne silom F , ravnomerno raspoređenoj na površini S , tada se sila u celosti prenosi na porast unutrašnjeg naprezanja (slika 4.4.a). Kako na gumi nema bočnih zidova, širenje prema bokovima je slobodno (slika 4.4.b), pa je bočno naprezanje G proporcionalno vertikalnom naprezanju F/S :

$$G = kF/S, \quad (4.2)$$

gde je k koeficijent proporcionalnosti.



Slika 4.4. Koža od silikonske gume; a) nenapregnuta, b) napregnuta

Između bočnog naprezanja i deformacije u opštem slučaju postoji nelinearna zavisnost. Ako se ova zavisnost aproksimira nelinearnom funkcijom

$$G = k_1 \left(l^2 - \frac{1}{l} \right), \quad (4.3)$$

gde su k_1 koeficijent i $l=L/L_0$ relativna deformacija gume (odnos aktuelne debljine L i početne L_0), tada je normalno naprezanje, tj. pritisak F/S , takođe nelinearna funkcija oblika

$$\frac{F(l)}{S} = \frac{k_1}{k} \left(l^2 - \frac{1}{l^2} \right). \quad (4.4)$$

Dobijena jednačina može se linearizovati razvojem u Tejlorov red:

$$\frac{F(l)}{S} = \frac{k_1}{k} \left(l^2 - \frac{1}{l_0} \right)_{l=0} + \frac{k_1}{k} \left(l^2 - \frac{1}{l_0} \right)'_{l=0} \cdot (l-l_0) + R_n, \quad (4.5)$$

gde je sa R_n označen ostatak reda.

Nakon provođenja naznačenih operacija, jednačina (4.5) postaje

$$l^2 - \frac{1}{l} = \left(l_0^2 - \frac{1}{l_0} \right) + \left(2l_0 + \frac{1}{l_0^2} \right) \cdot (l-l_0) + R_n. \quad (4.6)$$

Izraz na levoj strani jednačine je ukupna nelinearna deformacija gume, a prva dva člana na desnoj strani predstavljaju

linearni deo te deformacije. Prema tome, R_n se može smatrati greškom linearnosti. Na osnovu geometrijskih odnosa:

$$l_0 = L_0/L_0 = 1 \quad (4.7)$$

$$l = L/L_0 = [L_0 - (L_0 - L)]/L_0 = 1 - \Delta l \quad (4.8)$$

$$\Delta l = l_0 - l \quad (4.9)$$

jednačina (4.6) dobija oblik:

$$(1 - \Delta l)^2 - \frac{1}{1 - \Delta l} = -3\Delta l + R_n. \quad (4.10)$$

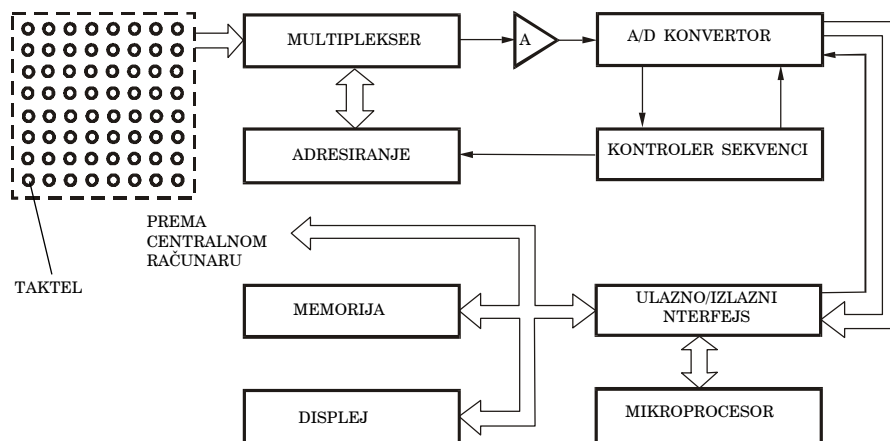
U praksi je obično najveće dozvoljeno sabijanje gume $\Delta l_{\max} = 1/3$. U tom slučaju greška linearnosti u deformaciji gume je $R_{n\max} = 5,56\%$.

Senzori pomeraja konvertuju deformaciju gume u električni signal, što je osnova mehanopercepcije. Postoji veliki broj različitih senzora napravljenih za ovu namenu, ali je samo manji deo prešao razvojni put od prototipa do komercijalnog proizvoda. Osnovne karakteristike svih taktilnih senzora su minijaturnost i visoka prostorna rezolucija.

Poređenje različitih tipova taktilnih senzora pokazuje da svaki ima određene prednosti i nedostatke u pogledu histerezisa, dinamičkog opsega, osetljivosti ili prostorne rezolucije. Na primer, kod kapacitivnog taktilnog senzora promena kapacitivnosti je mala i teško se meri on-line, kod pijezelektričnog postoji jak uticaj temperature i dr. Koji će se tip senzora odabrati zavisi od konkretnih zahteva i uslova primene.

Elektronski sklop omogućava obradu signala na nivou senzora (slika 4.5). Mikroprocesor prima signale sa senzora u digitalnom obliku zahvaljujući A/D konvertoru. Pomoću multipleksera skeniraju se takteli, obično poredani u pravougaonu matricu od 6×6 do 256×256 taktela. Svakom taktelu kao delu dodirne površine na ekranu se pridružuje piksel koji je osvetljen intenzitetom svetlosti proporcionalnim depresiji taktela.

Intenzitet osvetljenja na crno-belom ekranu predstavlja se najčešće skalom od 5–10 nijansi sive boje. Za većinu problema u industrijskoj praksi dovoljna je binarna vrednost (1 bit). Puna skala sa 256 nijansi sive boje (uključujući belu i crnu) omogućava da se reši širok spektar problema vezanih za finu manipulaciju i detekciju oblika predmeta.

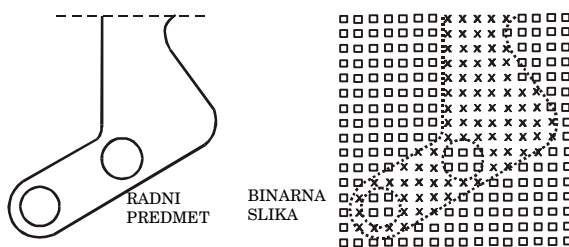


Slika 4.5. Mikroprocesorski sklop za obradu signala sa taktilne matrice

Obrada taktilne slike ima mnogo sličnosti sa procesiranjem optičke slike. Tipične funkcije jednog programa za obradu su sledeće:

- pojava (uočavanje slike);
- ekstrakcija karakteristika slike na osnovu aktuelne i prethodne slike;
- detekcija klizanja;
- merenje sile na celoj taktilnoj površini;
- ekstrakcija taktela sa maksimalnom vrednošću sile;
- transfer slike do računara višeg nivoa;
- kontrola slike na video displeju;
- obrada prekida zbog iznenadnih promena.

Najprostija obrada odnosi se na binarne slike, koje su tipične u kontroli kvaliteta ravnih komada različitog oblika (slika 4.6).



Slika 4.6. Binarna taktilna slika

4.2. OTPORNIČKI TAKTILNI SENZORI

4.2.1. Elastični otpornici

Karakteristike. Za gradnju otporničkih taktilnih senzora upotrebljavaju se otpornici čija otpornost zavisi od pritiska. Njihove osobine su:

- velika osetljivost na promenu pritiska (osetljivost $\Delta R/\Delta p$ nije konstanta jer je statička karakteristika nelinearna: $R = (k/p) + R_u$, pri čemu su k/p kontaktna (prelazna) otpornost i R_u unutrašnja otpornost);
- otpornost u neopterećenom stanju je 1–30 k Ω ;
- minimalna otpornost pri maksimalnom opterećenju je 5–100 Ω , tako da se mogu izbeći velike struje i preopterećenja analognih kola, a da se istovremeno omogući primena radnog napona do 10 V i olakša eliminacija šuma;
- dugovečnost (izdržljivost), tj. više od 10^6 ciklusa neopterećen \Leftrightarrow opterećen, pri čemu se karakteristike senzora ne menjaju više od 5%.

Provodni elastomer je prirodna ili veštačka guma koja se pod delovanjem sile sabija ili isteže i pri tome menja električnu otpornost. Spužvasta guma sa dodatkom ugljenika najstariji je elastični otpornik. Zbog nestabilne statičke karakteristike, velikog histerezisa, pojave zamora izazvanog dodatnim naprežanjem u tačkama sa česticama ugljenika, kao i zbog neuniformnih i slučajnih varijacija otpornosti, provodna guma nije pogodna za gradnju kontinualnih već samo binarnih taktilnih senzora.

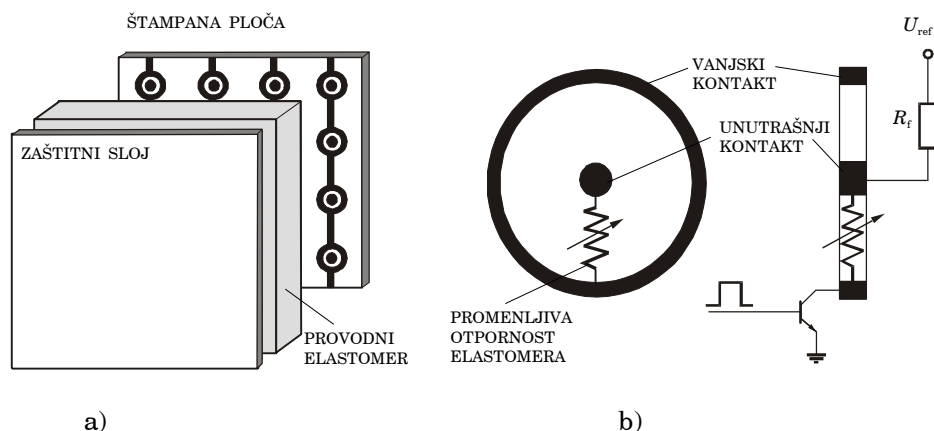
Navedeni nedostaci mnogo su manje izraženi kod sintetičkih elastomera, koji se prave od organskih polimera na bazi silicijuma – poznatih kao silikonske gume. Veliku perspektivu imaju tzv. provodne matrice od finih elastičnih vlakana impregniranih provodnim materijalom. U nenapregnutom stanju postoji određena vrednost otpornosti poprečno na matricu. Otpornost se menja kada deluje pritisak jer se vlakna približavaju i dodiruju, stvaraju se novi

i kraći provodni putevi, uz istovremeno smanjivanje kontaktne otpornosti na mestu dodira vlakana.

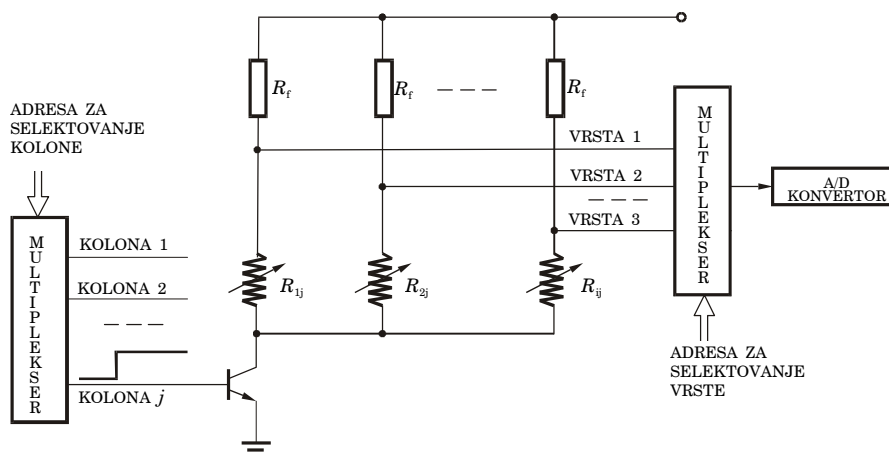
4.2.2. Taktilni senzor sa slojem elastomera na štampanoj ploči

Konstrukcija. Provodni elastomer je postavljen na ploču sa štampanim kontaktima (slika 4.7.a). Kontakti su u obliku koncentričnih prstenova između kojih se menja otpornost elastomera pod delovanjem sile. Vanjski prstenovi povezani su u kolone. Kolona je priključena na kolektor tranzistora za selektovanje kolone. Unutrašnji kontakti su na poledini pločice priključeni preko fiksnog otpornika $R_f = 1 \text{ k}\Omega$ na izvor napajanja $U_{\text{ref}} = 5 \text{ V}$. Kada se na bazi tranzistora za kolonu j pojavi impuls logičko 1, tranzistor provede i uspostavlja se kolo: izvor ($+U_{\text{ref}}$) – fiksni otpornik R_f – unutrašnji kontakt – provodna guma R_{ij} – zajednička elektroda sastavljena od vanjskih prstenova – tranzistor – masa (slika 4.6.b). Parcijalna struja kroz vrstu i pravi na otporničkom delitelju izlazni napon

$$U_{ij} = \frac{R_f}{R_f + R_{ij}} U_{\text{ref}}, \quad (4.11)$$



Slika 4.7. Taktilni senzor sa provodnim elastomerom na štampanoj ploči: a) konstrukcija, b) ekvivalentna šema taktela



Slika 4.7, nastavak: c) selektovanje taktela

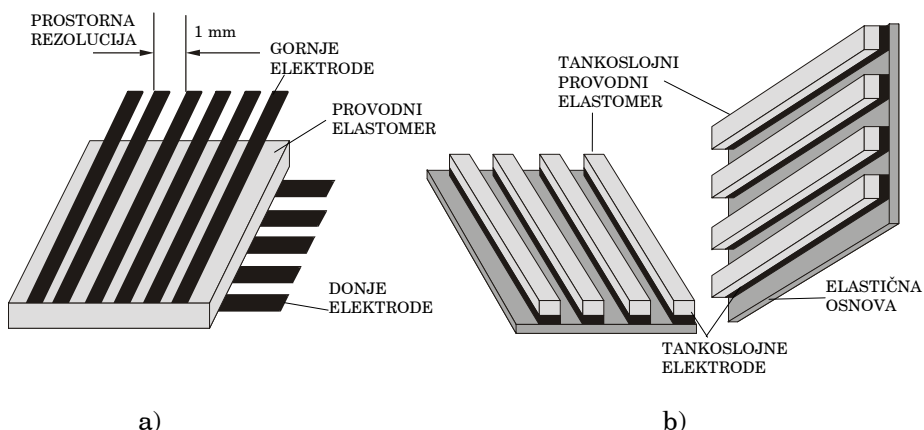
koji je obrnuto proporcionalan otpornosti taktela R_{ij} . Međutim, kako veća sila znači da je otpornost R_{ij} manja, to je izlazni napon direktno proporcionalan merenoj sili u tački (i,j) .

Selektovanje taktela (i,j) provodi se pomoću adrese vrste i i adrese kolone j koje su dovodene na analogne multipleksere u skladu sa programom koji nadzire kontroler. Odabrani izlazni signal U_{ij} pretvara se dalje u digitalni oblik i pamti u memoriji na lokaciji (i,j) . Analizom svih zapamćenih vrednosti $i,j=1,2,\dots,n$ dobija se distribucija sila na posmatranoj matrici, računaju se lokalne deformacije i dobija odgovarajuća taktilna slika objekta.

4.2.3. Otpornički senzori sa nizovima elektroda

Konstrukcija. Struktura ovog senzora sastoji se od dva niza paralelnih elektroda između kojih je sloj provodnog elastomera. Nizovi elektroda su postavljeni normalno jedan na drugi (slika 4.8.a). Kontaktna sila proizvodi lokalnu deformaciju elastičnog sloja, odnosno lokalnu promenu otpornosti koja se detektuje između dve odgovarajuće elektrode. Kada se senzor ugradi na prst robota, preko njega se stavlja jedna tanka membrana od polimera radi mehaničke zaštite. Membrana je upeta po obodu da se spreči njeno tangencijalno naprezanje. Ako se senzor ugradi i na ostale prste, posebnim programom uspostavlja se koordinacija dobijenih slika i formira potpuna taktilna vizija predmeta.

Senzor sa nizovima elektroda i otporničkim slojem od elastomera po jednostavnosti je bez premca među taktilnim sensorima. Dobre osobine su: razmeštaj elektroda napravljen prema potrebnom rasporedu taktela, multipleksiranje dato rasporedom elektroda i uniformnost parametara otporničkog sloja (svi takteli skoro jednaki). Glavni nedostatak je veliki broj žica za povezivanje senzora i elektronskog bloka – za n senzorskih elemenata potrebno je $2n$ žica.

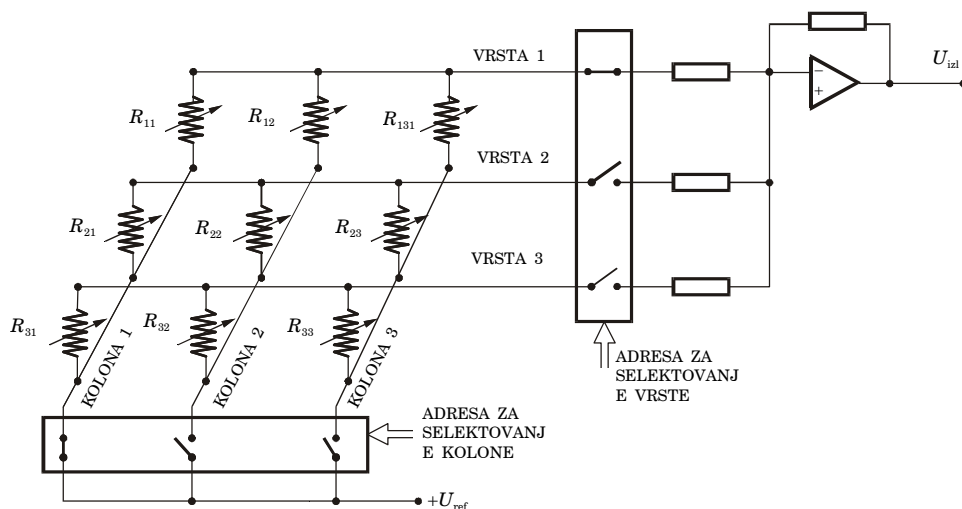


Slika 4.8. Otpornički senzor: a) konstrukcija sa otporničkim slojem, b) konstrukcija sa optporničkim trakama od polimera

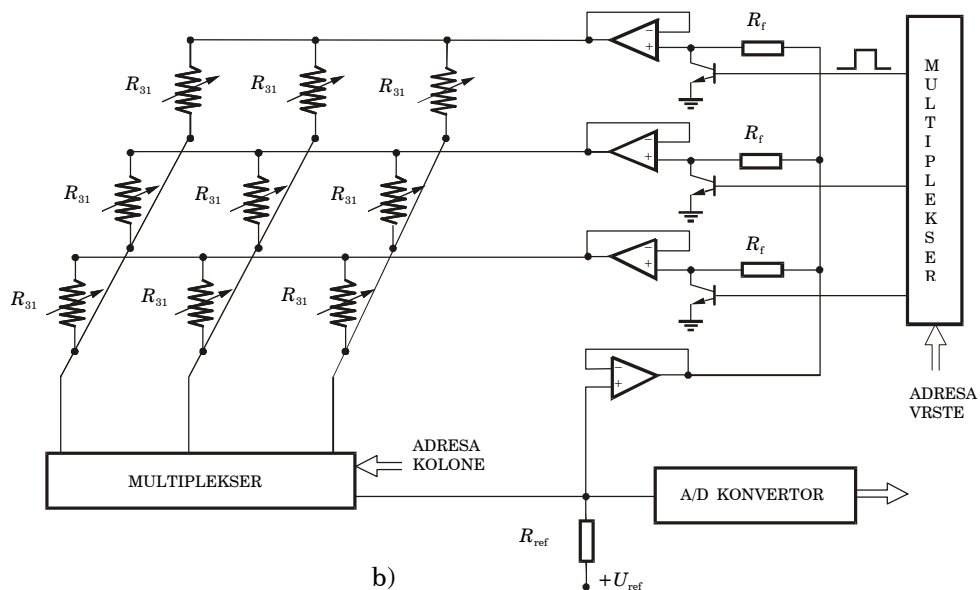
Savremenija konstrukcija u tehnološkom pogledu sastoji se od elastične polimerske osnove na kojoj su nanete tankoslojne trake metalnog provodnika, a preko njih je tankoslojni otpornički polimer debljine 0,05 mm. Dve ovakve strukture spajaju se jedna naspram druge pod uglom od 90° (slika 4.8.b). Ukupna debljina opisanog taktilnog senzora može da bude svega 0,125 mm, što omogućava apliciranje na prst različitog oblika i veličine. U presečištu vrsta i kolona dobijaju se takteli sa prostornom rezolucijom od 0,5 mm.

Selektovanje. Otpornici (takteli) kod senzora sa otporničkim slojem i kod senzora sa otporničkim trakama formiraju mrežu. Zato se aktivni takteli ne mogu direktno meriti – merena struja grana se kroz susedne kolone i vrste ako su neselektovane vrste otvorene. Neka je taktilna matrica 3×3 priključena na jednostavnu šemu za očitavanje (slika 4.9.a). Kada se očitava taktel sa otpornošću R_{11} , strujno kolo bi trebalo da bude: $+U_{ref} - kolona\ 1 - R_{11} - vrsta\ 1$.

Međutim, kolo može da se zatvori i na drugi način, na primer: $+U_{\text{ref}}$ – kolona 1 – R_{21} – R_{22} – R_{12} – vrsta 1.



a)



b)

Slika 4.9. Selektovanje taktela za senzor sa nizovima elektroda: a) neselektovane vrste otvorene, b) tehnika povratne sprege

Neželjena grananja struje eliminišu se pomoću različitih šema kojima je zajedničko da razlika potencijala postoji samo između

selektovane kolone i selektovane vrste. Između selektovane kolone i neselektovanih vrsta nema potencijalne razlike, pa nema ni neželjenih grananja merene struje.

Efektno rešenje za eliminaciju uticaja susednih taktela je tehnika povratne sprege (slika 4.9.b). Izdvajanje taktela (i,j) ostvaruje se adresiranjem vrste i i kolone j pomoću analognih multipleksera kojima upravlja kontroler. Prvo se izdvaja kolona j , a kada se na bazi tranzistora pojavi signal logičko 1, uključuje se željena vrsta i unutar te kolone i formira kolo: $+U_{\text{ref}} - R_f - \text{kolona } j - R_{ij} - \text{vrsta } i - \text{masa}$. Na otporničkom delitelju napona dobija se odgovarajući izlazni signal U_{ij} . Da bi se selektovani taktel izolovao od ostalih, moraju se sprečiti struje između selektovane kolone i neselektovanih vrsta. Zbog toga je izlazni napon doveden kao napon povratne sprege na sve vrste osim vrste j , tako da su spojevi između selektovane kolone i neselektovanih vrsta na istom potencijalu i nema grananja struje.

4.2.4. Problemi merenja otpornosti taktela

Električna otpornost merenog taktela smanjuje se sa porastom normalne sile po eksponencijalnom zakonu:

$$R_m = K \cdot e^{-F/\beta}, \quad (4.12)$$

gde su k i β konstante, a F normalna sila. Efektivna, tj. stvarno izmerena otpornost između vrste i i kolone j u tački (i,j) u idealnom slučaju jednaka je aktuelnoj vrednosti otpornika R_m , odnosno $R_{\text{ef}} = R_m$, a osetljivost na merenu silu je

$$\frac{dR_{\text{ef}}}{dF} = -\frac{k}{\beta} \cdot e^{-F/\beta} = -\frac{R_m}{\beta}. \quad (4.13)$$

Realna situacija je drugačija. Pritisak je raspoređen na dodirnoj površini, tako da je i otpornički sloj u okolini taktela (i,j) takođe pritisnut. Njegova otpornost R_p u paralelnoj je vezi sa R_m , pa je efektivno merena otpornost

$$R_{\text{ef}} = \frac{R_m R_p}{R_m + R_p}, \quad (4.14)$$

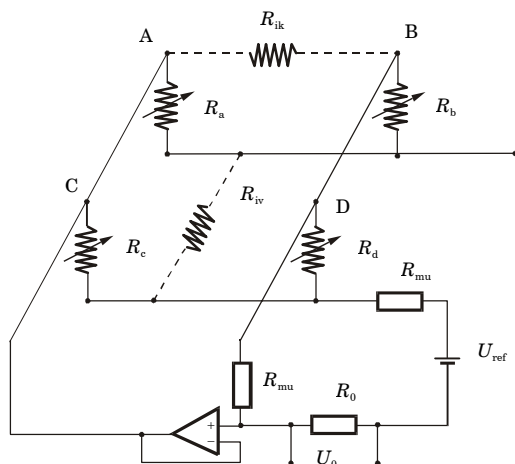
a osetljivost nelinearna:

$$\frac{dR_{ef}}{dF} = - \frac{(R_m/\beta) \cdot R_p^2}{(R_m + R_p)^2}. \quad (4.15)$$

Elastični otpornički sloj ima izotropna svojstva. Zbog toga je $R_p \approx R_m$, pa je $R_{ef} \approx R_m$, a osetljivost $dR_{ef}/dF = -0,25(R_m/\beta)$, tj. četiri puta manja od idealne vrednosti (4.13).

Tankoslojni trakasti otpornik ima anizotropna svojstva. Zbog toga je $R_p \gg R_m$ i $R_{ef} \approx R_m$, a osetljivost je skoro konstantna i jednaka idealnoj: $dR_{ef}/dF = -(R_m/\beta)$.

Tačnost merenja. Izotropni karakter sloja elastomera i anizotropni karakter elastomerskih traka odražavaju se na tačnost merenja otpornosti tehnikom povratne sprege. Za analizu ovog uticaja dovoljno je razmotriti matricu sa 2×2 taktela. Na slici 4.10 prikazana je ekvivalentna električna šema kola kada je pomoću multipleksera selektovan taktel D i otpornost R_d priključena na referentni napon U_{ref} .



Slika 4.10. Ekvivalentna električna šema pri selektovanom taktelu D

R_{iv} , pa se paralelno sa R_d formira put R_b-R_{iv} i konačan rezultat je smanjenje osetljivosti.

Kada je u pitanju senzor sa mrežom od otporničkih traka, R_{iv} i R_{ik} su veoma veliki, pa se formira željeno strujno kolo $R_0-R_{mu}-R_d-R_{mu}$. Izlazna otpornost R_0 i otpornost analognog

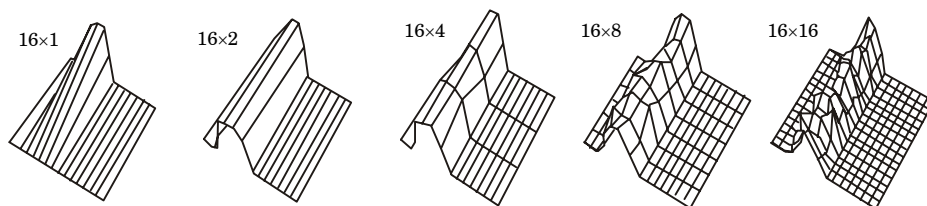
Kada je u pitanju senzor sa slojem elastomera između elektroda, tada je zbog njegovog izotropnog karaktera $R_p \approx R_m$, pa su otpornosti između susednih vrsta R_{iv} i otpornosti između susednih kolona R_{ik} približno jednake otpornosti R_d , odnosno: $R_{iv} \approx R_{ik} \approx R_d$. Tačka A je povratnom spregom dovedena na isti potencijal kao tačka B. Između kolona zato ne teče nikakva struja, ali je između vrsta otpornost

multipleksera R_{mu} su po 100Ω i mnogo su manje od otpornosti polimera $R_d=10^4-10^5 \Omega$. Velika otpornost otporničkih traka daje veliki izlazni napon U_0 , čija vrednost zavisi od intenziteta normalne sile na datom taktelu.

4.2.5. Preključivanje taktela

Obadva tipa otporničkih senzora (sa otporničkim slojem i otporničkim trakama) mogu da deluju na sličan način kao taktilni senzori kod čoveka. Prostorna rezolucija i zona detekcije taktilnih senzora kod čoveka, naime, zavise od dubine na kojoj se senzori nalaze. Senzori koji su dalje od površine kože imaju nisku rezoluciju i reaguju na kontaktni pritisak na širokoj regiji, a senzori bliži površini imaju visoku rezoluciju i reaguju na manjoj regiji.

Ovakav način rada može da se sintetizuje veštački: uključivanjem malog broja senzora na određenoj površini detektuju se dodir i intenzitet sile, a uključivanjem većeg broja senzora na toj istoj površini detektuju se distribucija sile, tj. oblik predmeta. Kratkim spajanjem, na primer, dve susedne vrste one se ponašaju kao jedna. Na sličan način spajaju se i susedne kolone, odnosno proizvoljan broj susednih vrsta ili kolona. Prespajanje se kontroliše dinamički preko prekidača postavljenih između vrsta i između kolona.



Slika 4.11. Odzivi senzora pri preključivanju od strukture 16×1 do strukture 16×16

Na primer, matrica 16×16 sa dinamičkim preključivanjem obično se prvo konfiguriše u matricu 1×1 . Tada svi takteli rade kao jedan što omogućava samo detektovanje kontakta sa radnim objektom. Radi lokalizacije kontakta redom se uključuju strukture 2×2 , 4×4 , 8×8 i, na kraju, ako je potrebno, 16×16 . Najveća frekvencija skeniranja postiže se kod 1×1 , a najmanja kod 16×16

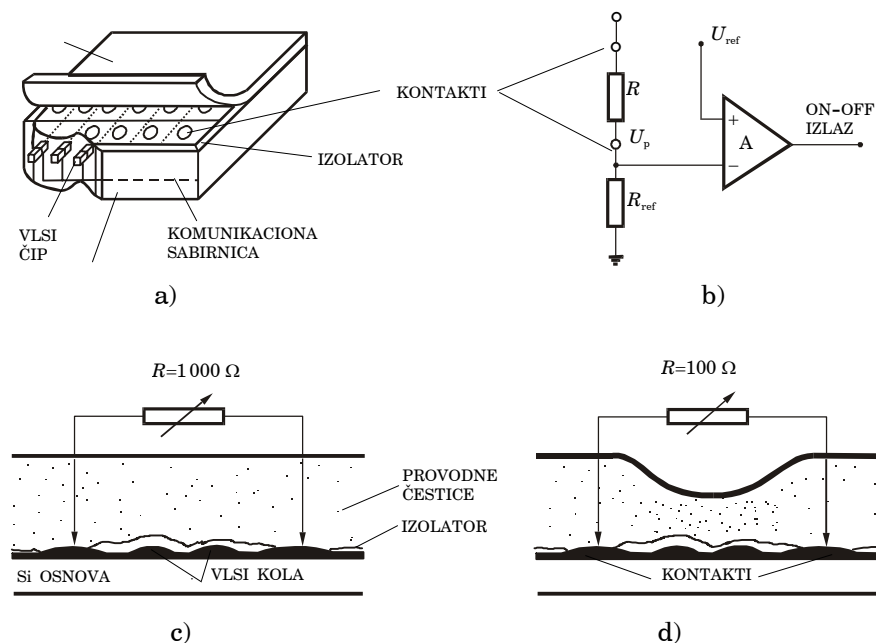
matrice. Za očitavanje jednog taktela (adresiranje, prenos, A/D konverzija) treba $50 \mu\text{s}$, pa je maksimalna frekvencija skeniranja matrice 1×1 tačno 20 kHz, a matrice 16×16 oko 80 Hz. Na slici 4.11 prikazan je postupak detekcije ivice tankog predmeta metodom rekonfiguracije struktura 16×1 , 16×2 , 16×4 , 16×8 i 16×16 . Prednost ove metode je u brzini dobijanja taktilne informacije uz primenu minimalnog broja komponenti.

4.2.6. Otpornički senzor sa VLSI kolima

Ako se elektronska kola za obradu signala kod senzora sa otporničkim elastomerom postave podalje od taktilne površine, tada je broj od $n+1$ ili $2n$ žica za povezivanje suviše veliki, posebno kada žice idu preko pokretnih prstiju šake robota. Osim toga, kroz žice tada idu paralelne i neobrađene informacije. Ugradnju elektronskih kola neposredno uz senzore, međutim, teško je ostvariti zbog skućenog prostora u prstima robota. Ovi problemi izvanredno su rešeni implantacijom elektronskih kola vrlo visokog stepena integracije VLSI (*Very Large Scale Integration*) direktno u strukturu taktilnog senzora.

Konstrukcija. Senzor ima višeslojnu strukturu: ispod sloja otporničke gume je silicijumska osnova (*wafers*) sa VLSI kolima u kojima su svi analogni i digitalni elementi potrebni za obradu signala (slika 4.12.a). Na površini integriranih kola nalaze se aluminijumske elektrode debljine 0,1–0,2 mm. Prostor između elektroda zaliven je izolatorskim slojem od kvarca radi zaštite VLSI kola i bolje selektivnosti kontakata između gume i kola.

Promena otpornosti elastične gume između dva kontakta jednog taktela detektuje se pomoću jednostavnog komparatora (slika 4.12.b). U nenapregnutom stanju između kontakata otpornost gume je $R=1000 \Omega$, a u opterećenom stanju pri defleksiji otpornost je $R=100 \Omega$ (slika 4.12.c,d). Na komparator se nastavljaju digitalna kola za obradu, pri čemu svaki taktel ima svoja nezavisna kola i time je u potpunosti ostvareno paralelno procesiranje. Upotreba analognog komparatora omogućava detekciju sile sa većom rezolucijom od jednog bita po taktelu – umesto jednog praga kompenzacije U_{ref} tada postoji nekoliko pragova: $U_{\text{ref}1}, U_{\text{ref}2}, \dots, U_{\text{ref}n}$.



Slika 4.12. Otpornički senzor sa ugrađenim VLSI kolima: a) struktura, b) komparator, c) neopterećen taktel, d) opterećen taktel

Karakteristike. Prostorna rezolucija od 1 mm po taktelu, koja je inače tipična za industrijske robote, postiže se sa ovim tipom senzora bez teškoća – na prostoru od 1 mm lako se smešta sva potrebna elektronika. Zbog ograničenja vezanih za konverziju pritiska u otpornost, zbog složenosti obrade u VLSI kolima i disipacije toplote u kolima, smatra se da je krajnji domet prostorna rezolucija 25×25 taktela na 1 mm^2 .

Svaki taktel spojen je preko centralne komunikacione sabirnice RS-232C sa glavnim računarom, a preko lokalnih sabirnica sa susednim taktelima. Sekvencijalni kontroler zbog veličine nije smešten u samom senzoru već je eksterno spojen na sabirnicu preko interfejsa. Pomoću njega kontrolise se rad sabirnice i omogućava svakom taktelu napajanje, takt impulse, referentni napon U_{ref} i istovetnu sekvencu instrukcija. Zahvaljujući takvoj organizaciji takteli istovremeno i na isti način konvertuju pritisak u otpornost (napon), obrađuju merne signale i rezultate šalju preko sabirnice do centralnog računara. VLSI čipovi sadrže sva kola za navedene operacije:

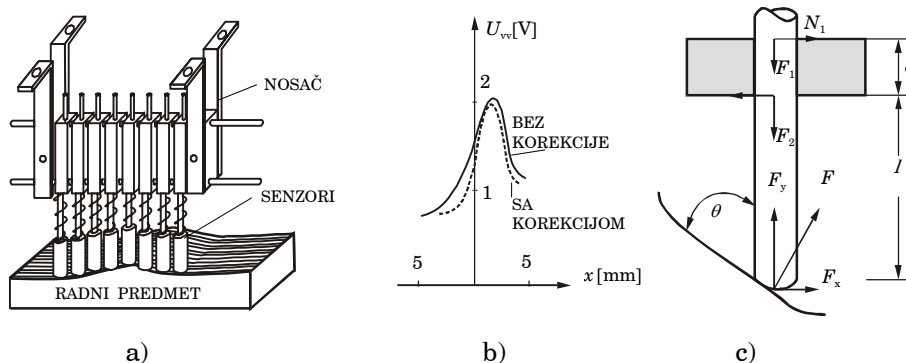
- komparator sa podešljivim nivoom komparacije;

- leč registar za propuštanje rezultata poređenja do aritmetičko–logičke jedinice ALU;
- ALU za obradu signala sa taktela;
- kontroler za nadziranje rada ALU jedinice.

4.3. ELEKTROMAGNETSKI TAKTILNI SENZORI

4.3.1. Induktivni

Konstrukcija. Induktivni senzori su robusni i pogodni za detekciju većih objekata u industrijskim uslovima. Na slici 4.13.a prikazan je klasični taktilni uređaj sa 8×8 induktivnih elemenata transformatorskog tipa. Svaki element sastoji se od uskog čeličnog šiljka smeštenog u plastični cilindar i opruge od fosforne bronz. Fosforna bronza ima dobra elastična svojstva i ne remeti magnetsko polje. Širenje opruge pri smanjivanju kontaktne sile omogućava reverzibilno kretanje šiljka.



Slika 4.13. Induktivni taktilni senzor: a) konstrukcija, b) statička karakteristika, c) proračun kritičnog ugla

U gornjem delu uređaja smešteni su primarni (pobudni) i sekundarni (merni) navoji. Amplituda indukovano izlaznog napona menja se u zavisnosti od pomeranja čeličnog šiljka (slika 4.13.b). Za pozitivni pomeraj od 2 mm dobija se približno skokovita promena amplitude U_{vv} , mereno od vrha do vrha. Ako se greške koriguju posebnim kolima, skokovita promena može se dobiti i za manji

pomeraj: 1 mm. U skladu sa takvim izlaznim signalima, taktilna slika predmeta ima binarni karakter.

Granični uslovi. Šiljak sa kojim se moduliše transformatorska sprega može se zaglaviti u cevi kada je površina po kojoj se kreće suviše nakošena (slika 4.13.c). U tačkama dodira šiljka i cilindra postoje ravnoteža kontaktnih momenata:

$$\begin{aligned} F_x \cdot (d+l) - N_1 \cdot d &= 0 \\ F_x \cdot l - N_1 \cdot d &= 0, \end{aligned} \quad (4.16)$$

gde su d dužina vodice na ulazu u cev i l dužina šiljka izvan cevi.

U tačkama dodira između cilindra i šiljka deluje i statičko trenje sa koeficijentom trenja k , tako da je

$$\begin{aligned} F_1 &= kN_1 \\ F_2 &= kN_2 \end{aligned} \quad (4.17)$$

Šiljak će se zaglaviti kada je

$$F_1 + F_2 \geq F_y. \quad (4.18)$$

Kritični ugao θ pri kome dolazi do zaglavlivanja može se lako izračunati na osnovu prethodnih jednačina:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{F_y}{F_x} = \frac{2l + d}{d} \cdot k. \quad (4.19)$$

Poželjno je da senzor prati što veće krivine na objektu, tj. da ugao θ bude što manji. Zato koeficijent trenja k i odnos l/d treba da su mali.

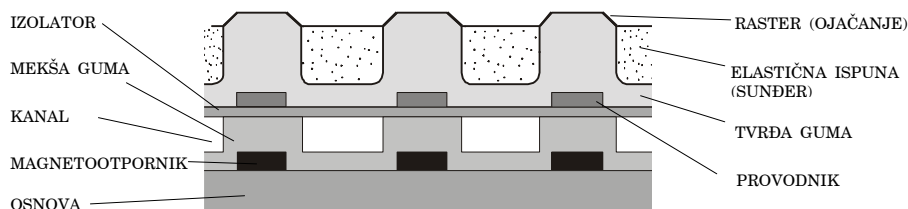
4.3.2. Magnetootpornički

Princip rada temelji se na zavisnosti električne otpornosti R magnetootpornika od magnetskog polja H , pri čemu je relativni položaj magnetootpornika u polju u vezi sa delovanjem sile na dodirnoj površini.

Konstrukcija senzora je višeslojna (slika 4.14). Osnova je od alumine (aluminijev oksid Al_2O_3) na koju je prvo fotolitografskim postupkom nanet magnetorezistivni materijal tako da se dobiju

željeni matični raspored, oblik i orijentacija magnetoopornika. Magnetoopornički materijali su legure permaloj (19%Fe+8%Ni), vikaloj (Co+V+Fe) i kromidur (Cr+Fe+Co) ili heteroepitaksijalne strukture InSb-InAs (indijum-antimonid i indijum-arsenid) ili InSb-NiSb (indijum-antimonid i nikal-antimonid). Istim postupkom zatim su nanete električne veze i kontaktne stopice od zlata. Tipična matrica ima 8×8 elemenata i smeštena je na površini 2,5×2,5 cm, sa rastojanjem između elemenata od 2,5 mm. Inače maksimalna rezolucija je oko 0,5 mm.

Zatim se postavlja deformacioni sloj od gume. Sa tanjom gumom dobija se bolja rezolucija, a sa tvrdom gumom bolji dinamički opseg. Najčešće se upotrebljava guma debljine 0,2 mm čija je osetljivost na pritisak $2 \cdot 10^4$ – $2 \cdot 10^6$ N/m², odnosno dinamički opseg je 100. Celom dužinom senzora ukopani su kanali da bi se omogućilo nesmetano bočno širenje prilikom sabijanja gume.



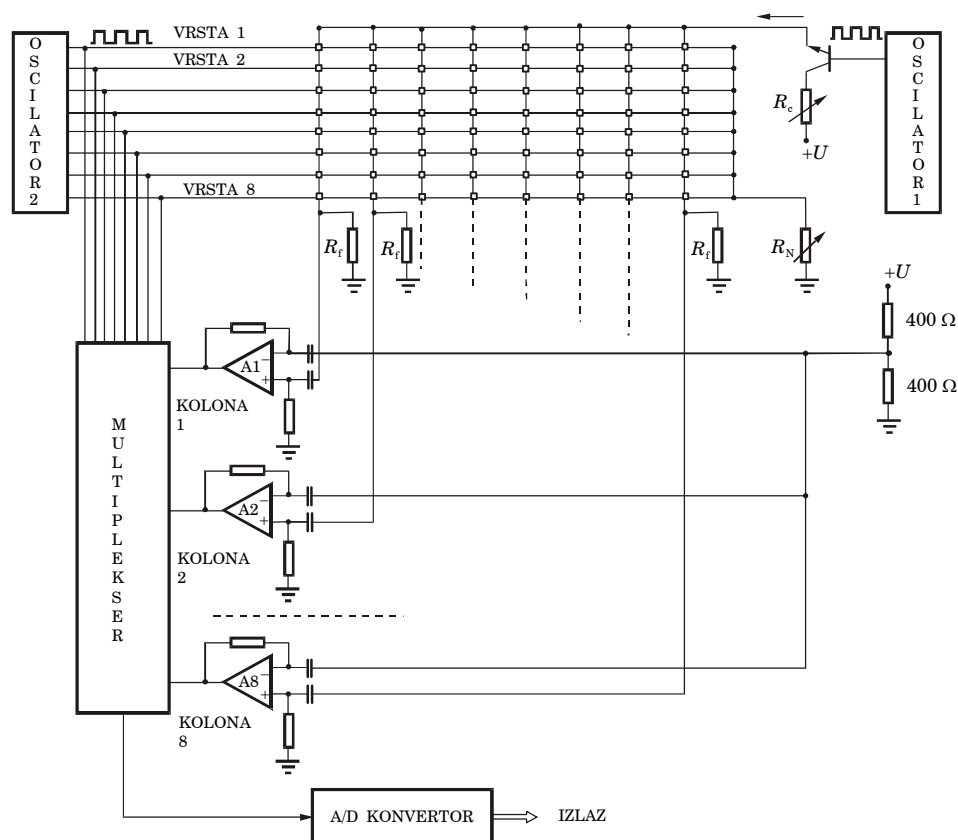
Slika 4.14. Struktura magnetooporničkog taktalnog senzora

Preko gume stavljen je sloj od neprovodnog materijala kao osnove na koju su naneti tankoslojni bakarni provodnici u obliku traka debljine 2 μm i širine 6 μm. Kroz ove provodnike teče jednosmerna struja I i stvara magnetsko polje H . Kada deluje sila, dolazi do sabijanja gume i provodnik se približava magnetooporniku. Porast jačine magnetskog polja detektuje se kao smanjenje otpornosti magnetoopornika.

Završni sloj debljine 5–7 mm takođe je od gume i ima zaštitnu funkciju. Kada su prisutne elektromagnetske smetnje, u završni sloj može da se ugradi oklop od isprepletane žice. Guma obično ima ojačan površinski raster koji odgovara matičnom rasporedu magnetoopornika, a između je ispuna od mekše gume ili spužve. Ojačanje omogućava direktan prenos pritiska sa površine do senzorskih elemenata i ne remeti prostornu rezoluciju senzora.

Pretraživanje aktivnih taktela provodi se pomoću elektronskog sklopa čija je pojednostavljena šema prikazana na slici

4.15. Oscilator 1 generiše niz pravougljih signala frekvencije 1 kHz koji dolaze na tranzistorski prekidač. Kada tranzistor vodi, struja I_c deli se na osam istovetnih kolona u kojima je priključeno po osam jednakih magnetootpornika: $8 \cdot 50 = 400 \Omega$. Vrednost struje I_c podešava se pomoću potencijometra R_c . Promena struje u obliku četvrtke odabrana je da se smanje termički šumovi koji su izraženiji kada je $I_c = const$. Frekvencija od 1 kHz dovoljno je velika da se elektromagnetske smetnje u toku trajanja impulsa mogu smatrati konstantnim.



Slika 4.15. Elektronska šema za pretraživanje aktivnih taktela

Oscilator 2 takođe generiše napon u obliku četvrtke, koje prolaze kroz tankoslojne bakarne provodnike formirajući magnetsko polje H . Optimalna jačina polja H podešava se potencijetrom R_H . Tokom $1/8$ radnog ciklusa ove četvrtke idu kroz jednu vrstu, u toku naredne osmine ciklusa kroz drugu vrstu i, tako redom, kroz poslednju. Na taj način svi magnetootpornici (takteli) u jednoj vrsti istovremeno su pobuđeni. U toku $1/8$ ciklusa multiplexer

sukcesivno uključuje jednu po jednu kolonu. Na dnu kolone je otpornik od $R_f=400\ \Omega$ sa kojeg se dobija napon proporcionalan promeni otpornosti selektovanog taktela. Taj napon se preko dvostranog diferencijatora i multipleksera vodi na A/D konvertor.

Karakteristike. Magneto otpornik je postavljen na rastojanju $d_0=0,22$ mm ispod tankoslojnog provodnika sa strujom $I=30$ mA. Kada je taktel pobuđen, to rastojanje se smanjuje najviše za jednu trećinu: $0,15\text{ mm} \leq d \leq 0,22\text{ mm}$. U tom intervalu magneto otpornik se nalazi u magnetskom polju tankoslojnog provodnika

$$H = \frac{I}{2\pi b} \left(\operatorname{tg}^{-1} \frac{c + b/2}{d} - \operatorname{tg}^{-1} \frac{c - b/2}{d} \right), \quad (4.20)$$

gde su b širina provodnika ($6\ \mu\text{m}$) i c nepodudarnost (pomeranost) centra magneto otpornika i sredine provodnika.

Kada se magneto otpornik nalazi tačno ispod provodnika, tada je $c=0$, odnosno jačina polja je:

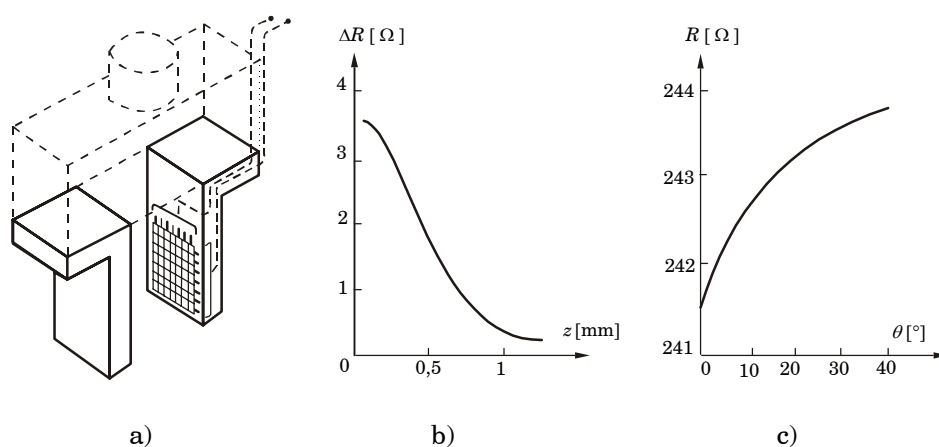
$$H = \frac{I}{\pi b} \operatorname{arctg} \frac{b}{2d}. \quad (4.21)$$

Jačina magnetskog polja raste sa smanjivanjem rastojanja b . Maksimalni porast $\Delta H_{\max} = H(d_0) - H(d_{\min})$ dobija se pri najvećoj depresiji gume $d_0 - d_{\min} = 0,33d_0$.

Na otpornost magneto otpornika ne deluje samo magnetsko polje provodnika koji je neposredno iznad njega već i polja susednih provodnika, što se odražava kao sistematska greška od $\pm 0,14-5\%$. Kao zaštita od magnetskih smetnji može da se ugradi oklop od isprepletane mrežice. Ali to nije nužno da se radi jer elektronski sklop omogućava da se otpornosti magneto otpornika najpre izmere kada je struja u tankoslojnim provodnicima jednaka nuli ($I=0$ i $H=0$), tj. kada deluje samo polje smetnji H_s . Zatim se očitavanje vrši u prisustvu oba polja $H_1 + H_s$, a razlika otpornosti koja se dobije predstavlja uticaj smetnje i služi za korekciju rezultata.

Specijalna konstrukcija. Standardni taktilni senzori mere samo vrednosti normalnih sila na kontaktnoj površini. Magneto rezistori u kombinaciji sa minijaturnim magnetskim dipolima omogućavaju konstrukciju senzora za merenje lokalnih sila i lokalnih momenta. Takav senzor ima površinski sloj sa ugrađenim mikromagnetskim dipolima ispod kojih su magneto otpornici na

čvrstoj podlozi. Ispod jednog magnetskog dipola ima više magnetootpornika. Njihov broj zavisi od toga koliko se komponenti lokalnih sila i momenata meri. Pošto idealni magnetski dipol ima pet stepeni slobode, potrebno je pet magnetootpornika raspoređenih tako da detektuju sile u taktilnoj ravni (u smeru osa x i y), silu normalno na ravan (u smeru ose z), torzioni moment (oko ose z) i moment klizanja (normalan na taktilnu ravan, oko ose y). Kada je u pitanju dinamička manipulacija objektom između prstiju robota, primarno je, najčešće i dovoljno, merenje sile torzije i momenta normalnog na taktilnu ravan, odnosno magnetootpornici treba da su aranžirani tako da detektuju translatorno i rotaciono kretanje magnetskog dipola. Tanji elastični sloj daje senzoru veću osetljivost na moment normalan na taktilnu ravan, a deblji elastični sloj omogućava bolju osetljivost na sile u ravni, tj. na silu torzije.



Slika 4.16. Magnetootpornički senzor za merenje lokalnih sila i lokalnih momenata: a) senzor na prstima robota, b) statička karakteristika $\Delta R(z)$, c) statička karakteristika $R(\theta)$

Na slici 4.16.a prikazan je opisani magnetootpornički senzor montiran na prstima robota. Tipična matrica ima 7×7 taktela. U svakom taktelu magnetootpornik je postavljen pod pravim uglom u odnosu na dipol. Zato se pri delovanju normalne sile, tj. prilikom paralelnog približavanja elemenata, smanjuje otpornost magnetorezistora pa je promena otpornosti negativna. Na primer, za magnetootpornik sa nominalnom otpornošću $R=243,75 \Omega$ ta promena je oko $1\%R$ kada se dipol približi za 1 mm (slika 4.16.b). Sile u ravni uslovljavaju rotaciono kretanje dipola oko ose z . Rotacija od $\pm 40^\circ$

dovodi do porasta otpornosti magnetootpornika približno za 1%, računato u odnosu na nominalnu vrednost R koju ima u srednjem položaju (slika 4.16.c). Statičke karakteristike $\Delta R(z)$ i $R(\theta)$ određuju se eksperimentalno.

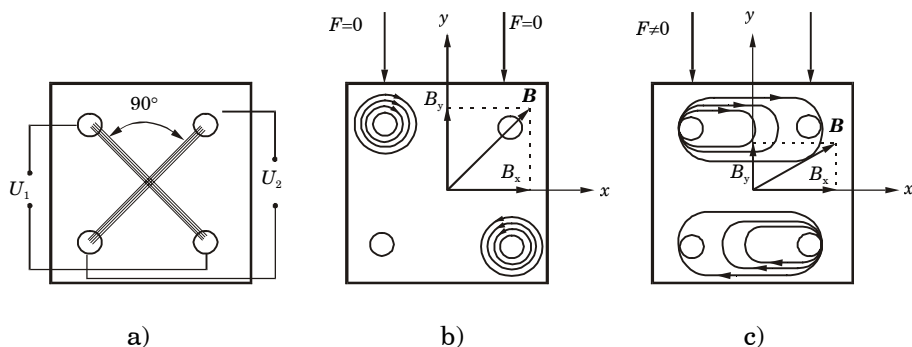
Magnetootpornici se prave tehnikom tankog sloja, sa dimenzijama $0,1 \times 0,7 \times 0,9$ mm. Istom tehnikom u elastični površinski sloj senzora deponuju se i magnetski dipoli, debljine do 25 μm .

4.3.3. Magnetoelastični

Konstrukcija. Magnetoelastični senzori upotrebljavaju se prevashodno za prepoznavanje oblika objekata i merenje sile na ravnoj taktilnoj površini. Tipična matrica ima 16×16 elemenata sa dimenzijama $8 \times 5 \times 3$ mm. Prostorna rezolucija nešto je manja nego kod drugih senzora, ali su ostale karakteristike povoljne: robusnost i izdržljivost na preopterećenje do 1 kg za opseg 0–100 g, veliki dinamički opseg (1000:1), osetljivost 5–7 mV/g, histerezis manji od 5%, temperaturna greška $\pm 1\%/^{\circ}\text{C}$ i ponovljivost $\pm 5\%$.

Magnetoelastični senzori mogu biti aktivni, parametarski i anizotropni. U izradi taktilnih senzora najbolje rezultate su pokazali anizotropni. Naime, neki materijali kao što su legure železa i nikla (permaloj), transformatorski čelik i amorfne metalne trake imaju izotropna magnetska svojstva u nenapregnutom stanju, ali kada se podvrgnu pritisku, magnetska svojstva menjaju se različito duž ose opterećenja i poprečne ose. Takav materijal služi kao jezgro mikrotransformatora, tj. senzora sile.

Tipična konstrukcija ima primar i sekundar pod uglom od 90° , sa istim brojem navoja: $N_1 = N_2 = 10$ (slika 4.17.a). Kada je element neopterećen ($F=0$), zbog izotropnog svojstva komponente magnetne indukcije B_x i B_y su jednake, vektor \mathbf{B} je paralelan sa sekundarnim navojima i izlazni napon U_2 jednak je nuli (slika 4.17.b). Kada je element opterećen ($F \neq 0$), permeabilitet se smanjuje u smeru delovanja opterećenja, a povećava u poprečnom smeru. Zbog toga je $B_x \neq B_y$ i vektor \mathbf{B} ima neki ugao θ u odnosu na sekundarne navoje. Komponenta B_{N2} koja je normalna na ravan sekundarnih navoja stvara magnetski fluks u sekundarnim navojima i generiše izlazni napon U_2 proporcionalan sili F (slika 4.17.c).

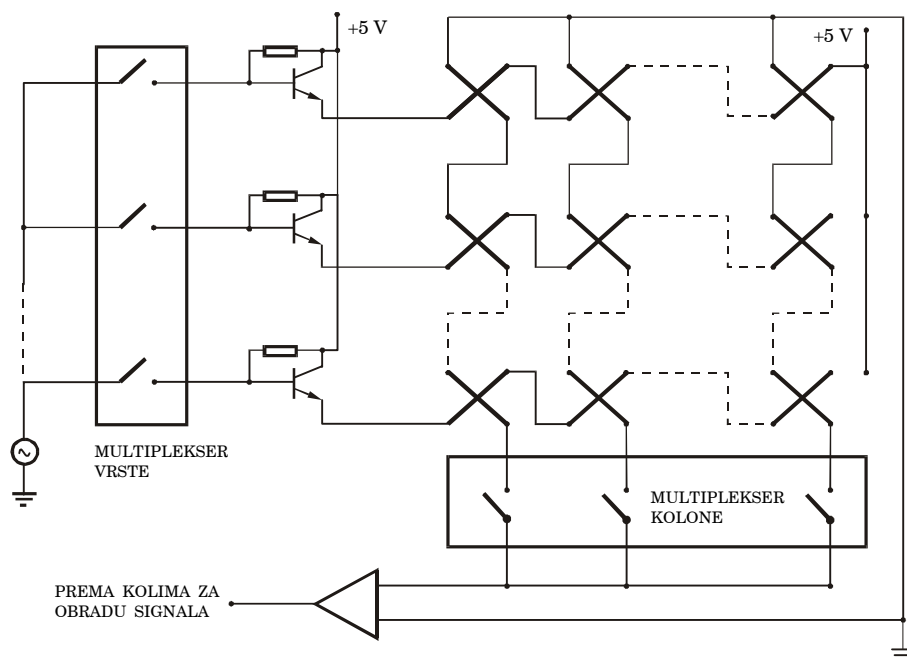


Slika 4.17. Anizotropni magnetoelastični element: a) konstrukcija, b) magnetska indukcija pri $F=0$, c) magnetska indukcija pri $F \neq 0$

Pretraživanje magnetoelastičnih senzora može se ostvariti na tri načina. Kod prvog načina primari svih elemenata spojeni su u seriju i priključeni na naizmenični naponski izvor, a željeni sekundar bira se preko multipleksera. Prednost ovog načina je što su svi elementi stalno aktivni i trenutno (sa vremenskom konstantom od nekoliko mikrosekundi) generiše izlazni napon proporcionalan sili, a nedostatak je međusobni uticaj između linija.

Drugi način je da se svi sekundari spoje u seriju, a da se primari pretražuju sukcesivno pomoću multipleksera. Tako je samo jedan senzorski element aktivan i nema međusobnog uticaja.

Treći način je da se svi primarni navoji u istom redu senzorske matrice spoje u seriju, da se sekundarni navoji u istoj koloni takođe spoje u seriju, a da se očitavanje elemenata (i, j) provodi uključivanjem vrste i i kolone j pomoću multipleksera (slika 4.18). Svi primarni navoji u jednom redu imaju zajednički strujni drajver koji daje takvu struju (20–30 mA) da se dobije maksimalna osetljivost dU_2/dF . Frekvencija izvora je visoka (oko 20 kHz) da bi se dobila što veća induktansa primara. Izlazni signal malog je nivoa, pa se nakon pojačavanja filtrira od smetnji, pretvara u istosmerni signal i digitalizuje u A/D pretvaraču.



Slika 4.18. Pretraživanje matrice sa magnetoelastičnim elementima

4.4. KAPACITIVNI TAKTILNI SENZORI

4.4.1. Prostorna rezolucija

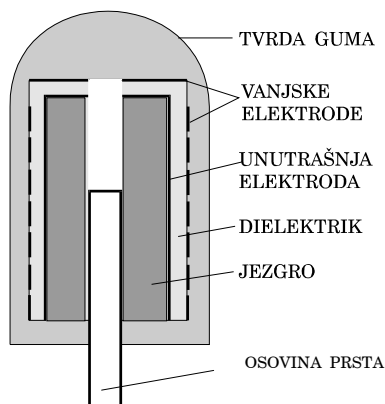
Prostornu rezoluciju od 1 mm pri detekciji predmeta dodirom nije uvek lako ostvariti. To se najbolje može pokazati na primeru kapacitivnih senzora. Neka je, na primer, senzor u obliku pločastog kondenzatora površine $S=0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$, sa rastojanjem između ploča $d=0,1 \text{ mm}$ i sa dielektrikom relativne dielektrične konstante $\epsilon_r=10$, tada je njegova kapacitivnost $C=220 \text{ fF}$. Ako se ploče takvog kondenzatora pod delovanjem pritiska približavaju najviše za 10%, tada je neophodno meriti pomeraje od 0,01 mm, odnosno varijacije kapacitivnosti od 22 fF. Smanjenje dimenzija kapacitivnog senzora radi postizanja potrebne rezolucije ima za posledicu dobijanje malih

vrednosti kapacitivnosti koje je teško izmeriti zbog smetnji i multipleksnog načina rada.

Ako se dimenzije elektroda povećaju na $S=2 \times 2 \text{ mm}^2$, a ostale veličine ostanu nepromenjene, kapacitivnost nepobuđenog senzora će biti $3,5 \text{ pF}$ sa maksimalnom promenom od $0,4 \text{ pF}$. Tehnika on-line merenja kapacitivnosti takvih vrednosti relativno je dobro razrađena, ali je prostorna rezolucija sa takvim senzorom relativno velika: $4\text{--}5 \text{ mm}$.

4.4.2. Primena pločastih kondenzatora

Konstrukcija. Prst robota je u obliku cilindra prečnika i dužine 25 mm , sa jezgrom od lake plastike prečnika 17 mm , (slika 4.19). Oko jezgra postavljena je zajednička cilindrična elektroda, a vanjske (pojedinačne) elektrode raspoređene su u matricu 7×7 , 7×12 ili 7×20 sa prostornom rezolucijom (rastojanjem između centara)



Slika 4.19. Raspored pločastih kondenzatora na prstu

$3\text{--}4 \text{ mm}$ po dužini prsta i 45° , 30° ili 12° po obimu. Rastojanje između susednih taktela je $0,3\text{--}0,5 \text{ mm}$. Dielektrik je od elastične gume ($\epsilon_r=1\text{--}10$, $d=0,5\text{--}0,8 \text{ mm}$), tako da je tipična vrednost pojedinačne kapacitivnosti $1\text{--}4 \text{ pF}$. Na poluloptastom vrhu prsta nalazi se jedan kapacitivni senzor sa kružnim ili prstenastim elektrodama, koji detektuje kontakt sa čeonu strane prsta. Zaštitna obloga je od čvrste gume ($E=2,5 \cdot 10^5 \text{ Nm}$) radi boljeg prenošenja normalne sile.

Modifikovana verzija opisanog taktilnog senzora ima kondenzatore sa vanjskim elektrodama u obliku prstena širine $2,5 \text{ mm}$ i unutrašnjim elektrodama u obliku uzdužnih traka čija širina zavisi od rezolucije po obodu.

Način rada. Kada se vanjska elektroda pod delovanjem normalne sile primakne za Δd , vrednost kapacitivnosti kondenzatora za taktel (i, j) računa se pomoću poznate formule

$$C_{ij} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d_0 - \Delta d} \text{ [F]}, \quad (4.22)$$

gde su: d_0 rastojanje između elektroda u nenapregnutom stanju [m], S površina elektroda [m²], ε_r relativna dielektrična konstanta elastičnog dielektrika i $\varepsilon_0 = (1/36\pi) \cdot 10^{-9}$ F/m dielektrična konstanta vakuuma.

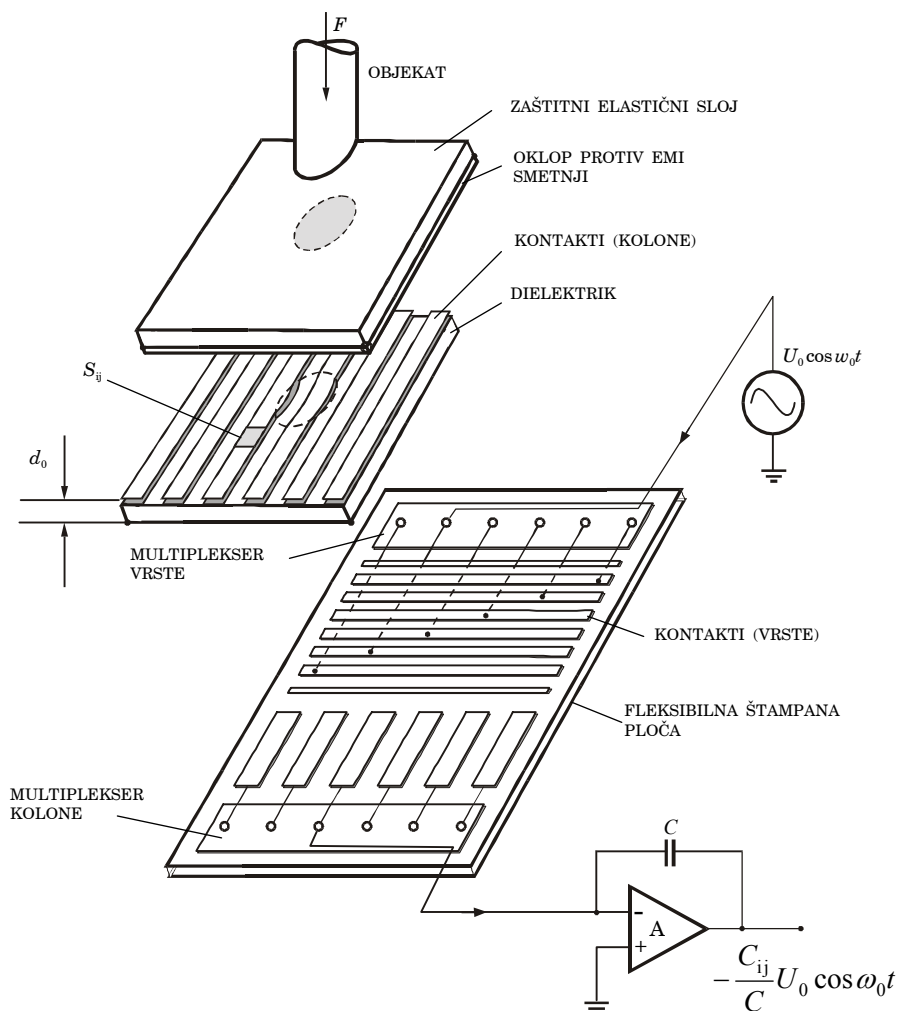
Selektovanje. Očitavanje kapacitivnosti C_{ij} provodi se pomoću multipleksera koji sve ostale vrste i kolone spaja sa masom (slika 4.20). Na izdvojeni kondenzator se pomoću oklopljenog kabla iz visokofrekventnog generatora dovodi napon $U = U_0 \cos \omega t$ frekvencije oko 100 kHz. Na izlaznoj strani senzor je drugim oklopljenim kablom priključen na pojačavač sa velikim vrednostima ulazne otpornosti R_p i ulazne kapacitivnosti C_p . U kapacitivnosti C_p sadržane su parazitne kapacitivnosti između vrsta i kolona i kapacitivnost priključnog kabla, pri čemu je $C_p \gg C_s$. U povratnoj sprezi pojačavača je kondenzator C , pa je izlazni napon

$$U_{ij} = -\frac{C_{ij}}{C} \cdot U \cos \omega t. \quad (4.23)$$

Relativna promena ovog napona je:

$$\frac{U_{ij} - U_0}{U_{ij}} = \frac{\frac{C_{ij}}{C} - \frac{C_{ij,0}}{C}}{\frac{C_{ij}}{C}} = 1 - \frac{C_{ij,0}}{C_{ij}} = 1 - \frac{d_0 - \Delta d}{d_0} = \frac{\Delta d}{d_0}, \quad (4.24)$$

gde su $C_{ij,0}$ i U_0 kapacitivnost i napon neopterećenog taktela (i, j). Pri tome je deformacija $\Delta d/d_0$ proporcionalna normalnom naprezanju $\sigma = E \cdot (\Delta d/d_0)$, odnosno merenoj sili, gde je E modul elastičnosti. Pri merenju napona U_{ij} i U_0 , za svaki taktel upotrebljen je isti priključni kabl i isti pojačavač, a parametri S , w , R_p i C_p imaju konstantne vrednosti koji ne utiču na relativnu deformaciju dielektrika između elektroda. Relativna deformacija $\Delta d/d_0$ zavisi samo od normalnog naprezanja i modula elastičnosti za taj taktel.



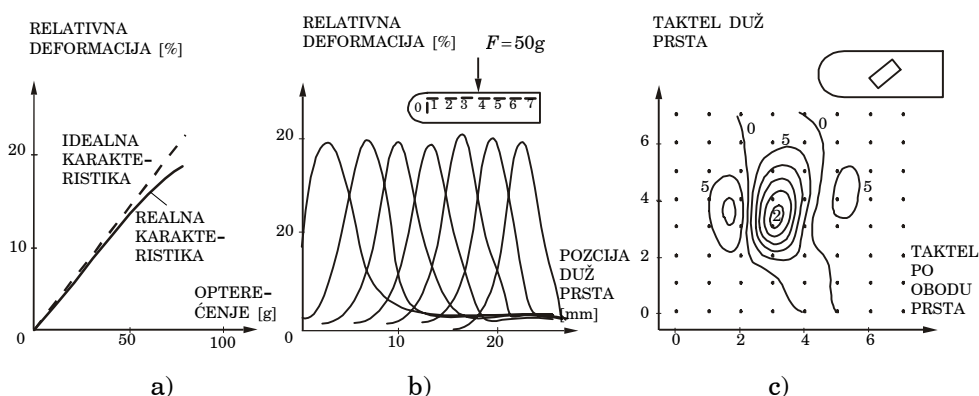
Slika 4.20. Multipleksiranje matrice kapacitivnih senzora

Karakteristike. Tipična statička karakteristika taktela, tj. zavisnost deformacije $\Delta d/d_0$ od opterećenja, pokazuje da za maksimalno opterećenje od 100 g (1 N) deformacija iznosi 25%, a odstupanje od idealnog pravca oko 2% (slika 4.21.a). Prilikom baždarenja, na senzor se deluje opterećenjem pomoću standardizovane cilindrične sonde sa poluloptastim vrhom određenog prečnika.

Osetljivost taktela definiše se kao broj grama opterećenja po jedinici promene A/D konvertora. Ako se 8-bitnom A/D konvertoru pridruži, na primer, 200 različitih vrednosti, tada je osetljivost

$100/200=0,5$ g. Zbog varijacija u dielektričnoj konstanti, osetljivost nije jednaka za sve taktela već iznosi 0,2–0,8 g, sa prosečnom vrednošću od 0,5 g po jedinici.

Maksimalna deformacija i koeficijent statičke karakteristike svakog taktela zapisuju se u jednoj tabeli radi normalizacije izlaza i kalibracije distribuiranog senzora u zavisnosti od geometrije. Na slici 4.21.b prikazan je normalizovani odziv jednog niza taktilnih senzora duž prsta na impulsno opterećenje. Standardna sonda deluje sa određenim opterećenjem (50–100 g) i pomera se od zaobljenog vrha do osnove prsta sa definisanim inkrementom (0,4–0,6 mm). Za svaku poziciju duž prsta očitavaju se u normalizovanom obliku odzivi svih sedam kapacitivnih senzora. Preklapanje odziva omogućava da se primenom interpolacionih tehnika izračunaju lokacija i intenzitet delovanja sile sa tačnošću $\pm 12\%$ (0,2 taktela), uz grešku pozicioniranja sonde od $\pm 0,5$ mm. Senzor se na sličan način kalibriše i po obodu, sa manjim ili većim preklapanjem odziva – zavisno od prostorne rezolucije po obodu prsta.



Slika 4.21. Kapacitivni taktilni senzor (pločasti): a) statička karakteristika taktela, b) odziv na impulsno delovanje duž prsta, c) konture deformacije senzora sa 7×7 taktela

Prepoznavanje oblika predmeta. Opisani taktilni senzor omogućava da se odredi oblik predmeta na površini dodira sa prstom. Na osnovu informacije o deformaciji taktela (i,j) može se pogodnim interpolacionim postupkom odrediti kontinualna deformacija $f(x,y)$. Ova funkcija predstavlja se u ravni koja se dobija kada se rastvori plašt prsta. Na slici 4.21.c prikazan je rezultat proračuna $f(x,y)$ pri dodiru većeg mekanog objekta, odnosno pri kontaktu sa drugim prstom.

Dešifrovanje oblika predmeta na osnovu funkcije deformacije $f(x,y)$ nije jednostavno. Pokazalo se da je analiza lakša na osnovu kontura dobijenih spajanjem tačaka sa jednakom deformacijom, tj. istom visinom k u odnosu na neopterećenu površinu prsta. Uslovi iz kojih se računaju konture su:

$$f(x, y) = k, \quad \frac{\partial f}{\partial x} = f_x = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial y} = f_y = 0. \quad (4.25)$$

Smer konture sa konstantnom visinom k iznad neopterećene površine računa se pomoću

$$\phi = -\arctg \frac{f_x}{f_y}. \quad (4.26)$$

Kontura se traži iteracionim postupkom pomoću prirasta

$$\Delta x = \Delta r \cdot \cos \phi \quad (4.27)$$

$$\Delta y = \Delta r \cdot \sin \phi, \quad (4.28)$$

gde je Δr korak iteracije. Kada se uvedu prirasti Δx i Δy , pomoću razlike $f(x + \Delta x, y + \Delta y) - k = 0$ računaju se nove vrednosti tačke x, y na konturi. Na slici 4.21.c prikazane su interpolirane konture naprezanja sa koracima deformacije od 5%, koje su dobijene kada se na prstu nalazi pravougaona pločica pod uglom od 45° u odnosu na uzdužnu osu prsta. Sila sa kojom deluje pločica je konstantna i iznosi 1 N.

Tehnika kontura jednakih deformacija omogućava brzo iterativno nalaženje maksimuma deformacije i koordinata maksimuma. Da bi na konturi bio maksimum, treba da su prvi izvodi jednaki nuli ($\partial f / \partial x = 0$, $\partial f / \partial y = 0$), a drugi izvodi da su manji od nule ($\partial^2 f / \partial x^2 < 0$, $\partial^2 f / \partial y^2 < 0$).

4.4.3. Primena cilindričnih kondenzatora

Konstrukcija. Taktilni senzori sa cilindričnim kondenzatorima imaju bolju prostornu rezoluciju od pločastih kondenzatora – do 0,2 mm. U zavisnosti od pritiska na taktilnu površinu, dielektrik se pomera u vertikalnom smeru i proporcionalno menja kapacitivnost koaksijalnog cilindričnog kondenzatora (slika 4.22.a).

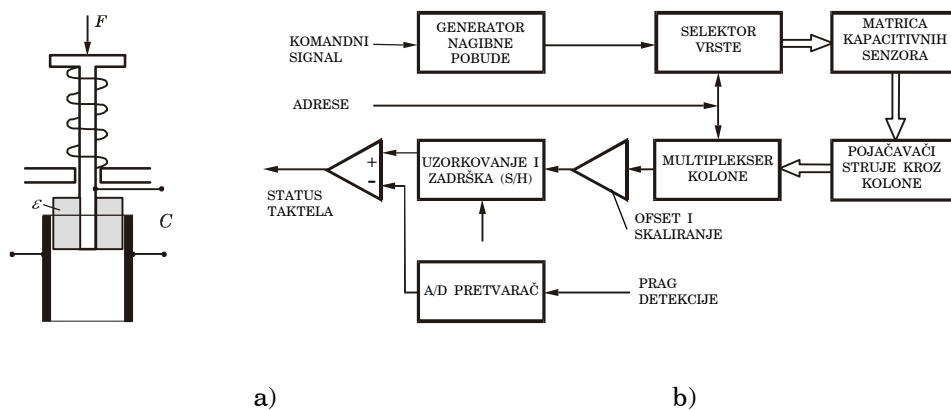
Osnova i vođice su od plastike. Opruga služi za reverzibilno pomeranje dielektrika u normalni položaj.

Pretraživanje. Kapacitivni senzor tradicionalno se priključuje na merni most, ali za tu tehniku kod taktilnih senzora nema dovoljno prostora. Za senzor sa pločastim kondenzatorima na slici 4.20 ilustrovano je pretraživanje kod kojeg multiplexer spaja na masu neselektovane vrste i kolone.

Elegantno 2D-pretraživanje realizuje se pomoću šeme prikazane na slici 4.22.b. Kada dobije komandu, generator nagibne funkcije daje napon sa konstantnom promenom: $dV/dt = const$. Ovaj napon vodi se na željenu vrstu i matrice, u skladu sa datom adresom u selektoru vrste. Svaka kolona spojena je na pojačavač, čiji je zadatak da struju kolone j , tj. struju odabranog taktela

$$I_{ij} = C_{ij} \frac{\varepsilon S}{d_{ij}} \cdot \frac{dV}{dt}, \quad (4.29)$$

pretvori u napon. Ovi naponi skeniraju se multiplexerom kolone, propuštaju kroz kolo za uzorkovanje i zadržku, te na kraju porede sa zadanim nivoom detekcije.



Slika 4.22. Kapacitivni taktilni senzor: a) cilindrična konstrukcija, b) pretraživanje

Kod svih kapacitivnih senzora na tačnost merenja jako utiču parazitne kapacitivnosti. Ovaj problem posebno je izražen kada se u

blizini senzora nalaze uzemljeni metalni objekti, što je čest slučaj u radnoj okolini robota.

4.5. PIJEZOELEKTRIČNI TAKTILNI SENZORI

4.5.1. Princip rada

Pijezoelektrični efekt. Kada na pijezoelektrični materijal deluje sila, nastaje deformacija u strukturi materijala koja dovodi do polarizacije molekulskih dipola. Kao rezultat na elektrodama se javlja naelektrisanje Q proporcionalno sili F :

$$Q = S_q F, \quad (4.30)$$

gde je S_q pijezoelektrična konstanta u smeru delovanja sile, tj. osetljivost naelektrisanja [C/N], koje zavisi od vrste materijala i pravca delovanja sile.

Pijezoelektrični senzor gradi se kao pločasti kondenzator, čija je ekvivalentna šema data na slici 4.23.a. Pošto je $Q=CU$, napon na elektrodama senzora je

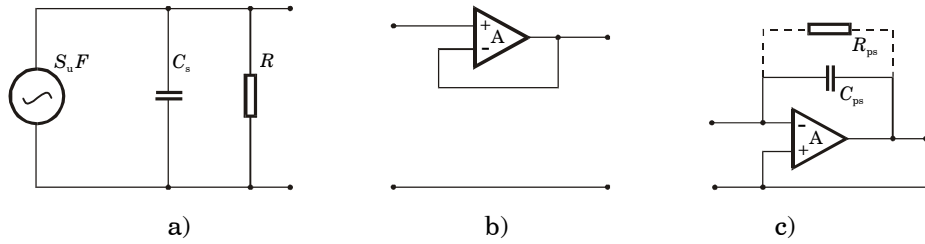
$$U = S_u F, \quad (4.31)$$

gde je S_u naponska osetljivost [V/N], pri čemu su osetljivost naelektrisanja i naponska osetljivost povezani relacijom $S_q=C \cdot S_u$.

Merenje napona. Signal sa pijezoelektričnog senzora je napon ili naelektrisanje. U prvom slučaju senzor je kablom priključen na naponsko sledilo (slika 4.23.b). Na njegovom izlazu je

$$U_{izl} = \frac{Q}{C} = \frac{S_q F}{C} = \frac{C_s \cdot S_u}{C_s + C_p' + C_p''} F. \quad (4.32)$$

Na tačnost merenja napona utiču kapacitivnost priključnog kabla C_p' i kapacitivnost ulaznog kola pojačavača C_p'' .



Slika 4.23. Pijezoelektrični senzor: a) ekvivalentna šema, b) pojačavač napona, c) pojačavač naelektrisanja

Merenje naelektrisanja. U drugom slučaju primenjuju se pojačavači sa kondenzatorom C_{ps} u povratnoj sprezi (slika 4.23.c), pa je izlazni napon

$$U_{izl} = \frac{Q}{C_{ps}} \quad \text{ili} \quad U_{izl} = \frac{C_s}{C_{ps}} U. \quad (4.33)$$

Ovaj način merenja je bolji jer na tačnost ne utiču parazitne kapacitivnosti C_p' i C_p'' . Paralelno kondenzatoru C_{ps} priključuje se otpornik R_{ps} radi sprečavanja zasićenja pojačavača koje nastaje usled integracije ofset napona.

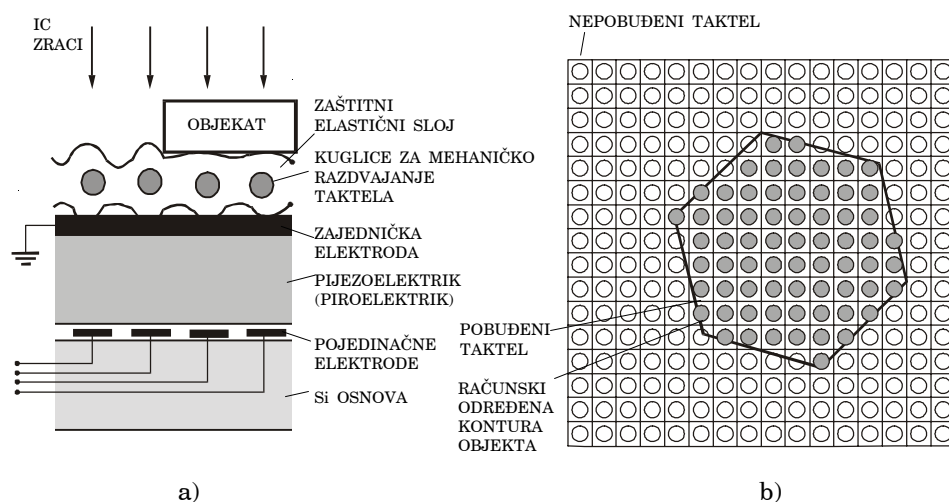
Osnovni su nedostaci pijezoelektričnih senzora su pražnjenje senzora naelektrisanja kroz vlastitu otpornost R_s , prisutnost piroelektričnog efekta i problemi ožičenja.

4.5.2. Konstrukcija matričnog senzora

Struktura ovog senzora je višeslojna. Osnova je od silicijuma i na njoj su fotolitografskim postupkom nanete disk elektrode prečnika 1,5–6 mm sa prostornom rezolucijom 3–8 mm. (slika 4.24.a). Elektrode su zalivene epoksidnom smolom da bi senzor imao potrebnu čvrstoću. Zatim dolazi tanki sloj pijezokeramike (10–100 μm) od barijum–titanata (BaTiO_3), olovo–titanata (PbTiO_3) ili olovo–cirkonata (PbZrO_3). Najbolji rezultati u tehnici tankih slojeva postižu se pomoću pijezopolimera polivilidenfluorida (PVDF). Na vrhu je sloj metala kao zajednička elektroda.

Za razliku od ostalih taktilnih senzora, pijezoelektrični nema elastičnu veštačku kožu kao deformacioni element, pa je zato pogodan za gradnju tzv. ravnog prsta ili dlana. Kod svih

piezoelektrika javlja se i piroelektricitet, naročito kod PVDF. Ova pojava u načelu deluje kao smetnja, ali se može i korisno upotrebiti. Na osnovu piroelektričnog efekta, naime, nastaju projekcije radnog predmeta na površini senzora. Projekcija se dobija sve dok je predmet osvetljen IC zracima, a kada se predmet spusti na površinu, nastaje piezoelektrični efekt i izlaz je proporcionalan sili dodira. Moguće je detektovati sile od 0,01 N po jednom taktelu, sa osetljivošću 20 pC/N, linearnošću 0,2–0,3% i sa frekventnim opsegom od 0,05–100 Hz.



Slika 4.24. Piezoelektrični senzor: a) konstrukcija, b) binarna slika predmeta

Elektronska kola za obradu signala sa piezoelektričnog taktilnog senzora u jednostavnijem slučaju spojena su nezavisno na svaki taktel. Svaki taktel ima svoj pojačavač naelektrisanja čiji se izlaz poredi na komparatoru sa prethodno definisanim nivoom osetljivosti. Aktivni takteli daju binarnu sliku radnog predmeta na taktilnoj površini, a posebnim programom za obradu slike računa se pozicija i orijentacija predmeta.

Informacije sa taktela, u složenijem slučaju, skeniraju se pomoću multipleksera i prosleđuju do zajedničkog pojačavača naelektrisanja, digitalizuju i obrađuju u računaru radi dobijanja i interpretacije integralne slike. Matrica od n taktela skenira se frekvencijom $f_s = 1/\tau_s = 1/n\tau$, gde je τ_s vreme potrebno za očitavanje cele matrice, odnosno τ vreme očitavanja jednog taktela. Izlazni napon sa taktela ΔU_k proporcionalan je promeni sile ΔF_k u periodu τ_s . Stvarna vrednost sile nakon k perioda računa se iz ukupnog napona

$U(k) = U(k-1) + \Delta U(k)$, pri čemu je $U(k-1)$ suma naponskih prirasta u toku $k-1$ prethodnih perioda τ_s .

Programi za obradu slike poboljšavaju tačnost senzora. Tako, na primer, za senzor sa 16×16 elemenata prečnika 6 mm i prostorne rezolucije 8 mm, centar šestouglaone slike (otiska predmeta) detektuje se sa greškom od svega $\pm 0,25$ mm (slika 4.24.b).

4.5.3. Ravni pijezelektrični senzor

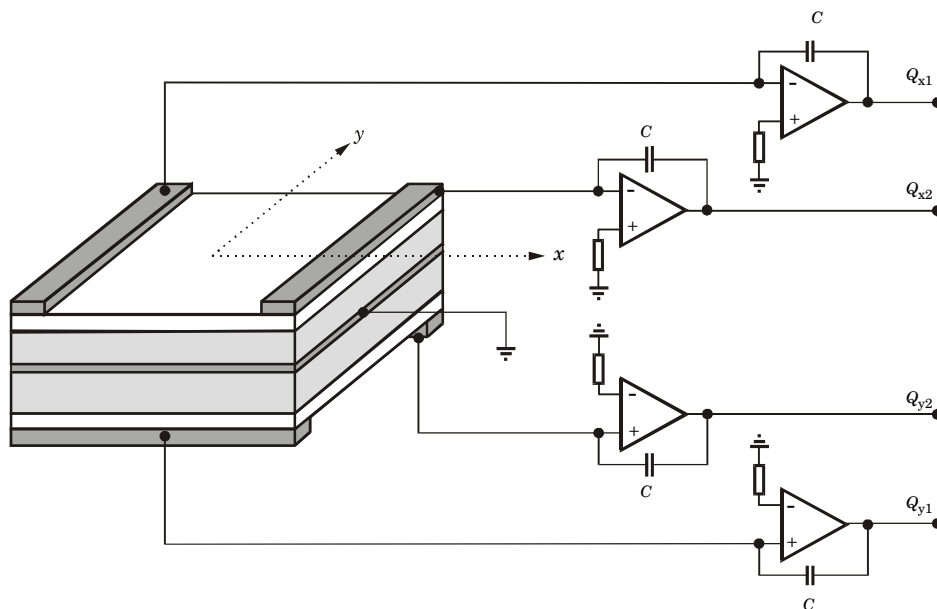
Struktura ravnog senzora sa uniformnom senzorskom površinom sastoji se od pet slojeva i pet elektroda (slika 4.25). Srednji sloj je od aluminijuma debljine $20 \mu\text{m}$ i predstavlja zajedničku elektrodu. Sa gornje i donje strane simetrično je postavljen prvo sloj pijezipolimera PVDF debljine $110 \mu\text{m}$, a zatim sloj otporničkog materijala debljine $30 \mu\text{m}$. U tehnološkom smislu nema problema da slojevi budu tanji, na primer $5-10 \mu\text{m}$, ali je zbog mehaničke izdržljivosti potrebno da ukupna debljina bude $200-300 \mu\text{m}$. Tada površina ravnog senzora može da iznosi $75 \times 75 \text{ mm}^2$.

Sa gornje strane na krajevima, paralelno sa osom y , nalazi se par tankoslojnih aluminijumskih elektroda. Drugi par takvih elektroda nalazi se sa donje strane, paralelno sa osom x . Otpornost između elektroda je oko $1 \text{ k}\Omega$. Elektrode su direktno spojene na pojačavače naelektrisanja.

Načina rada. Kada na senzor u tački (x, y) u trenutku $t=0$ počne da deluje skokovita promena pritiska $P(x, y) = P(x, y) \cdot 1(t)$, u toj tački javiće se naelektrisanje

$$Q(x, y) = d_{3j} P(x, y), \quad (4.34)$$

gde je d_{3j} pijezelektrična konstanta. Za $j=3$ to je pijezelektrična konstanta u smeru delovanja P , tj. duž ose z , a d_{31} i d_{32} su konstante duž poprečnih osa x i y .



Slika 4.25. Ravni pijezeletrični taktilni senzor

Pritisak, međutim, ne deluje samo u jednoj tački već se raspoređuje po celoj površini senzora, a to znači da je i potencijal distribuiran. Raspodela ovih veličina predstavlja se pomoću parcijalnih diferencijalnih jednačina. Elektronska šema prikazana na slici 4.25 ne omogućava određivanje konture predmeta, već samo centra (x,y) u kome deluje distribuirani pritisak i ukupne (integralne) vrednosti pritiska u tom centru: $P(x,y)$. Zaista, pijezelektricitet $Q(x,y)$ na gornjoj polovini senzora otiče kroz elektrode i akumulira se u kondenzatorima odgovarajućeg para pojačavača naelektrisanja.

Kolika će količina elektriciteta biti na jednom, a kolika na drugom paru, zavisi od lokacije tačke (x,y) i odnosa otpornosti (otporničkog sloja) od te tačke do elektroda. Ukupna količina elektriciteta na oba kondenzatora nakon završenog prelaznog procesa proporcionalna je ukupnoj sili u tački (x,y) :

$$\iint P(x,y) dx dy = \frac{1}{d_{31} [Q_{x1}(\infty) + Q_{y1}(\infty)]}. \quad (4.35)$$

Odnos količine elektriciteta, kao što je rečeno, zavisi od položaja tačke (x,y) između elektroda:

$$\frac{\iint xP(x, y)dxdy}{\iint P(x, y)dxdy} = a \frac{Q_{x1}(\infty) - Q_{x2}(\infty)}{Q_{x1}(\infty) + Q_{x2}(\infty)}, \quad (4.36)$$

gde je a rastojanje elektroda od centra senzora.

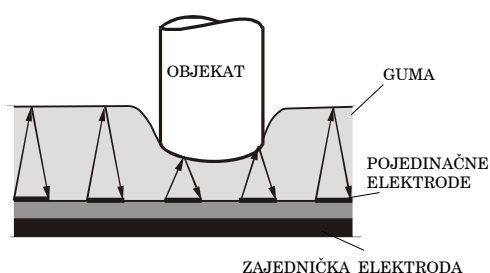
Na sličan način se pomoću $Q_{y1}(\infty)$ i $Q_{y2}(\infty)$ određuje koordinata y hvatišta sile. Krajnji rezultat su podaci o rezultantnoj sili i koordinatama centra (x, y) u kome ta sila deluje na ravnom senzoru. Prelazni proces traje oko 4–5 μ s, što znači da se mogu pratiti dinamičke promene sile do 200–250 kHz.

4.6. ULTRAZVUČNI TAKTILNI SENZORI

Princip rada ultrazvučnih taktilnih senzora zasniva se na principu TOF, tj. na merenju vremena koje je potrebno ultrazvučnom talasu da pređe put od predajnika do objekta i nazad do prijemnika:

$$t=2d/c, \quad (4.37)$$

gde su: t vreme [s], d aktuelna debljina elastičnog sloja [m] i c brzina ultrazvuka [m/s].



Slika 4.26. Ultrazvučni takteli

pojedinačne elektrode sa rezolucijom manjom od 0,5 μ m, a preko njih je sloj elastične gume debljine 3 mm (slika 4.26).

Konstrukcija senzora je višeslojna. Osnova je najčešće provodna i služi kao zajednička elektroda na kojoj je sloj pijezipolimer PVDF debljine 30 μ m. PVDF je odabran zato što se lako nanosi u tankom sloju i na zakrivljenoj površini kao što je prst robota. Sa gornje strane pijezipolimera nalaze se

Na taktele se dovode električni impulsi, pa nastaje inverzni pijezelektrični efekat i PVDF osciluje, tj. generiše se ultrazvuk. Ultrazvuk prolazi kroz gumu do njene površine i nazad do PVDF koji sada radi kao prijemnik ultrazvuka. Vreme prelaska ovog puta direktno je proporcionalno debljini gume i sili sa kojom predmet deluje na taktilnu površinu.

Tačnost merenja. Izvestan problem predstavlja malo vreme preleta ultrazvuka za mala rastojanja. Na primer, ako je $d=3$ mm i $c=1000$ m/s, tada je $t_{\max}=6$ μ s. Pri maksimalno dozvoljenoj kompresiji gume od 20%, put ultrazvučnog talasa je najkraći ($d_{\min}=2,4$ mm) i vreme preleta najmanje ($t_{\min}=4,8$ μ s). Interval $\Delta t=t_{\max}-t_{\min}=1,2$ μ s je dinamički opseg merenja vremena. Ako se taj interval, a time i interval promene sile i debljine gume, mere sa rezolucijom od 1/50, tada je potrebno meriti vreme od $\Delta t=24$ ns.

Ovaj problem rešava se generisanjem ultrazvuka visoke frekvencije ($f=10-50$ MHz) ili posrednim merenjem vremena preleta preko promene u razlici faza $\Delta\theta=\omega t$ između emitovanog i reflektovanog talasa: $\Delta t=\Delta\theta/2\pi f$.

4.7. OPTOELEKTRONSKI TAKTILNI SENZORI

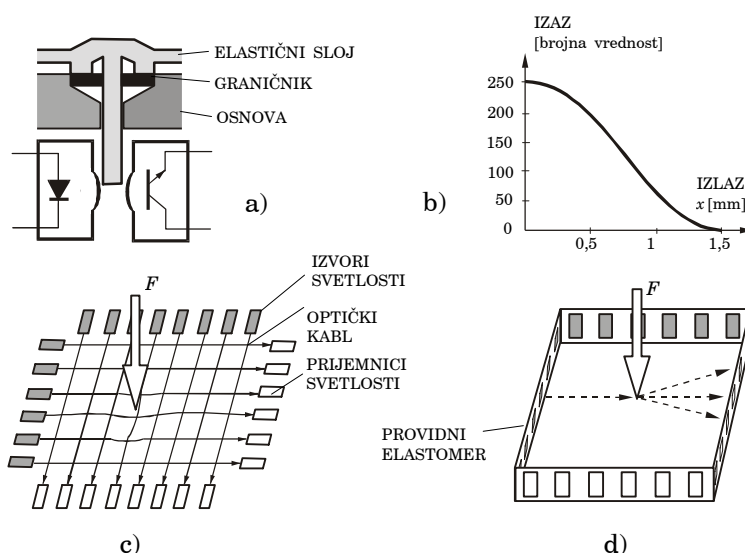
4.7.1. Primena optoelektronskog para

Način rada. Za gradnju taktilnih senzora primenjuju se optički parovi sa prekidanjem ili sa refleksijom optičkog zraka. Jedan od prvih optoelektronskih taktilnih senzora ovog tipa napravljen je početkom 70-tih godina. Sila pritiska na elastičnom površinskom sloju senzora pretvara se u odgovarajući proporcionalni pomeraj šiljka koji moduliše intenzitet svetlosti na putu između LED diode kao emitera svetlosti i fototranzistora kao prijemnika (slika 4.27.a). Vođice pokretnog šiljka sprečavaju bočno kretanje i taktel reaguje samo na normalnu silu.

Karakteristike. Uparivanje karakteristika LED diode i fototranzistora provodi se u elektronskom delu senzora, tako da svi takteli imaju istu statičku karakteristiku. Odstupanje karakteristika

pojedinih optoelektronskih parova moguće je korigovati i programski, na osnovu podataka dobijenih kalibracijom. Za hod šiljka 0–1,5 mm na izlazu se dobija struja fototranzistora čiji dinamički opseg može lako da se očita sa rezolucijom 1:250. 250 brojnih jedinica na izlazu odgovara očitavanju pomeraja rezolucijom od 6 μm (slika 4.27.b).

Senzori sa modulacijom apsorpcije svetlosti. Optička vlakna i neke providne plastične mase pod delovanjem pritiska menjaju koeficijent apsorpcije svetlosti. Ova osobina može efikasno da se iskoristi u kombinaciji sa optoelektronskim parovima. U prvom slučaju predajnici i prijemnici svetlosti poredani su duž naspramnih strana pravougule matrice i povezani su optičkim kablovima (slika 4.27.c). U drugom slučaju kao modulator apsorpcije svetlosti koristi se pravougli sloj providnog polimera oko kojeg su razmešteni predajnici i prijemnici svetlosti (slika 4.27.d).

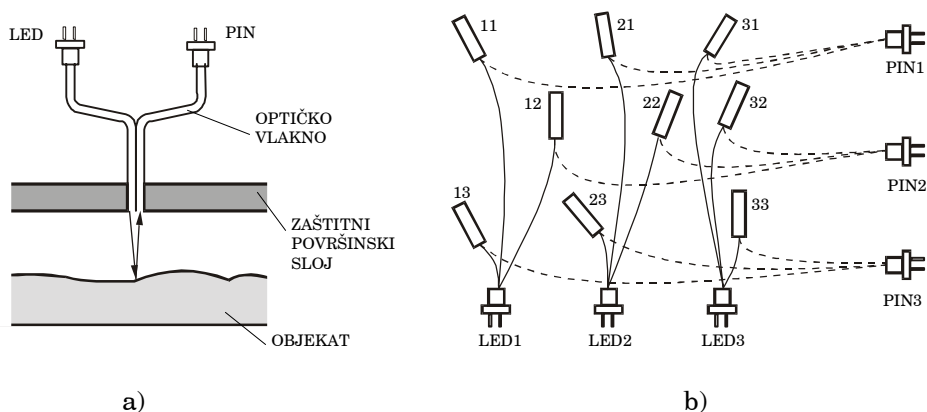


Slika 4.27. Taktel sa LED diodom i fototranzistorom: a) konstrukcija sa modulacijom intenziteta svetlosti, b) statička karakteristika, c) konstrukcija sa modulacijom apsorpcije svetlosti u optičkom vlaknu, d) konstrukcija sa modulacijom apsorpcije svetlosti u polimeru

4.7.2. Primena optičkih vlakana

Konstrukcija. Taktilni senzor visoke rezolucije može se izgraditi primenom optičkog vlakna kao senzora pomeraja. Dovodnim optičkim vlaknom svetlost iz LED diode obasjava radni predmet, a reflektovana svetlost se povratnim optičkim vlaknom odvodi na prijemnik: fototranzistor ili PIN diodu (slika 4.28.a). Intenzitet reflektovane svetlosti zavisi od udaljenosti predmeta i koeficijenta refleksije njegove površine.

Karakteristike. Pošto je vanjski prečnik optičkog vlakna 125–400 μm , moguće je ostvariti visoku rezoluciju. Za kvadratnu matricu potrebno je n^2 optičkih izvora i n^2 prijemnika. Posebnom konstrukcijom, tzv. koncentracijom optičkih vlakana, ovaj broj od $2n^2$ elemenata redukuje se na $2n$. U takvim konstrukcijama jedna LED dioda osvetljava n vlakana, a jedna PIN dioda povezana je sa n povratnih optičkih vlakana (slika 4.28.b). Multiplexer prvo uključuje LED₁ i pomoću PIN₁, PIN₂, ..., PIN_n redom detektuje pozicije tačaka 11, 12, ..., 1n. Zatim se uključuje LED₂ i prijemnici od PIN₁ do PIN_n i detektuje stanje tačaka 21, 22, ..., 2n. Postupak se ponavlja sve do poslednje diode LED_n.



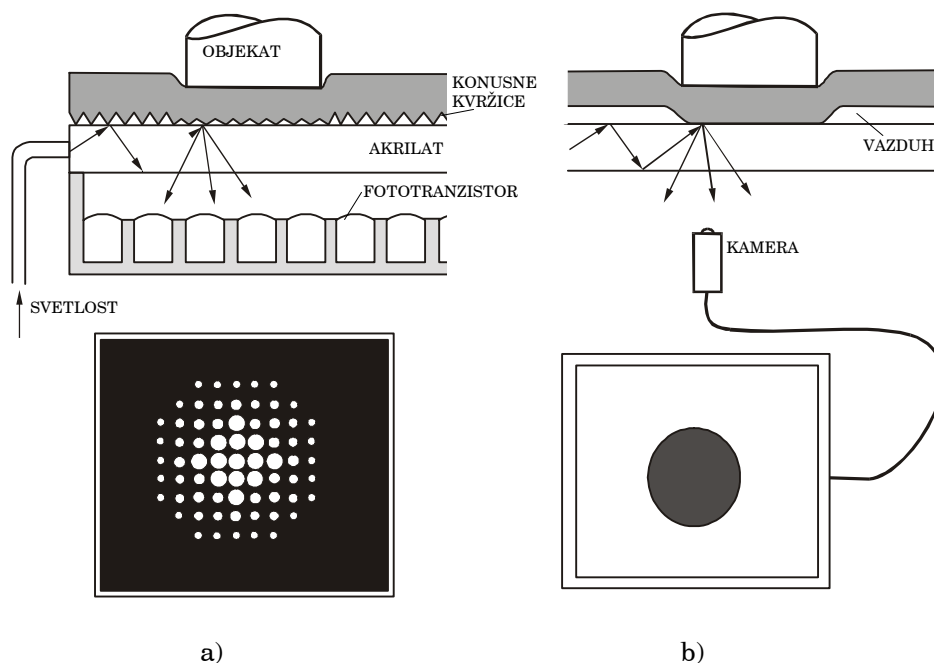
Slika 4.28. Optoelektronski taktilni senzor: a) jedan tektel, b) matrica

Prednost ovog senzora je u izvanrednoj detekciji pomeraja objekta poprečno na pravac pružanja optičkog vlakna, a mana mu je osetljivost na prašinu i nečistoće. Specijalnom konstrukcijom prsta u obliku cilindra iskorištene su prednosti i prevaziđeni opisani nedostaci. Završeci optičkih vlakana raspoređeni su unutar

cilindra tako da pomični prstenovi na obodu cilindra prilikom kontakta sa objektom presecaju optičke zrake i menjaju njihov intenzitet proporcionalno kontaktnoj sili.

4.7.3. Akrilatni senzor

Akrilatni senzor sa tranzistorima. Konstrukcija senzora sastoji se od osnove sa fototranzistorima, sloja transparentnog akrilata (10 mm) i elastičnog gumenog sloja debljine 2 mm (slika 4.29.a). Akrilat ima svojstvo da provodi svetlost sa totalnom unutrašnjom refleksijom, tj. bez gubitaka, zahvaljujući znatno većem indeksu prelamanja u odnosu na vazduh.



Slika 4.29. Akrilatni senzor: a) sa fototranzistorima, b) sa CCD elementima

Kada nema pritiska na taktilnu površinu, tada se akrilatna površina nalazi u vazdušnom sendviču. Svetlost dovedena optičkim vlaknom u potpunosti prolazi kroz akrilat i svi fototranzistori ostaju u mraku. Međutim, kada postoji pritisak objekta na gumeni sloj, stvara se kontakt između gume i akrilata. Na tom mestu refleksija

nije totalna jer guma ima veći indeks prelamanja svetlosti od akrilata i dolazi do difuzije svetlosti. Difuzna svetlost koja izlazi iz akrilata detektuje se pomoću fototranzistora. Guma je napravljena od belog silikona da bi se pojačao efekat refleksije. Fine konusne kvržice na površini gume sa rastojanjem (rezolucijom) od 1 mm nakon pritiska stvaraju reflektujuću površinu, tj. otisak predmeta koji se detektuje fototranzistorima. Fototranzistori su smešteni u udubljenjima na međusobnom rastojanju od 3,5 mm. Tipična matrica ima 16×32 taktela na površini od 117×56 mm².

Akrilatni senzor sa ekranom ima sličnu konstrukciju kao i prethodni (slika 4.28.b). Razlika je u načinu detekcije intenziteta difuzne svetlosti koja nastaje na mestu kontakta elastične silikonske membrane i akrilata. Kao senzor svetlosti ovde je upotrebljena CCD kamera priključena na standardni monitor. Fina mikrostruktura površine membrane omogućava kontakt sa akrilatom sa rezolucijom čija vrednost može biti čak jednaka rezoluciji ekrana. Tipična rezolucija je 256×256 taktela na površini od 2 cm².

4.8. INTEGRISANI SILICIJUMSKI SENZORI

4.8.1. Principi gradnje

Primena veštačke kože kao deformacionog elementa u gradnji taktilnih senzora dala je dobre rezultate, posebno koža od otporničkog elastomera u sprezi sa VLSI kolima. Tehnološki problemi usklađivanja mehaničkih i električnih karakteristika kože još uvek nisu rešeni na zadovoljavajući način.

Taktilni senzori nove generacije grade se na silicijumskoj osnovi preko koje se postavlja sloj elastomera – sada isključivo sa funkcijom zaštite od mehaničkih oštećenja. U silicijumskoj osnovi ugrađena je potrebna elektronika za primarnu obradu signala, a deformacioni element nadograđuje se tehnikama mikromehanike:

- nagrivanjem silicijumskog kristalnog tela;
- deponovanjem ili nagrivanjem strukturnih slojeva na površini silicijumske osnove.

Detekcija deformacije u oba slučaja provodi se pomoću ugrađenih pijeootpornika ili kondenzatora. Oni se zasad primenjuju relativno ravnopravno, mada istraživanja ukazuju da mikrosenzori na bazi kondenzatora imaju svetliju perspektivu zbog stabilnijih temperaturnih karakteristika i veće osetljivosti na manjem opsegu.

4.8.2. Tehnika nagrivanja Si tela.

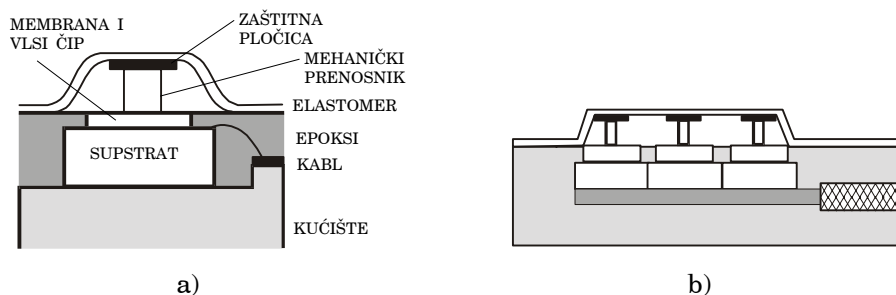
Način gradnje. U silicijumski supstrat prvo se ugradi VLSI čip sa elektronskim kolima za primarnu obradu signala sa taktela. Od drugog komada silicijuma nagrivanjem se formira deformacioni element željenog oblika i lepi za podlogu. Silicijum se, inače, pokazao kao izvanredan materijal za gradnju mikromehaničkih elemenata, jer u širokom intervalu naprezanja ima linearnu deformaciju, izvanrednu čvrstoću i dobre dinamičke karakteristike.

Deformacioni element najčešće je u obliku konzole, kvadratne ili kružne membrane. U centru membrane uzdiže se cilindrični štapić za prenos vanjske sile. Na vrhu je plastična podloška debljine 250 μm čija je namena da spreči kidanje elastomerskog površinskog sloja na ostrim ivicama štapića (slika 4.30.a).

Integrirani pijeootpornički senzori. Deformacija silicijumskog elastičnog elementa detektuje se pomoću pijeootpornika spojenih u Vitstonov most. Metodom difuzije ili jonske implantacije u membranu se dopiraju primese i na taj način menja specifična otpornost poluprovodnika. Na tom mestu dobija se pijeootpornik. Ako je membrana napravljena od poluprovodnika n -tipa, primese su p -tipa i specifična otpornost pijeootpornika je

$$\rho = \frac{1}{ep\mu_p}, \quad (4.38)$$

gde su: p koncentracija šupljina, μ_p odgovarajuća pokretljivost i e naelektrisanje elektrona. Membrana može biti od p -tipa i tada su primese donorske, a specifična otpornost je $\rho = (en\mu_e)^{-1}$.



Slika 4.30. Tehnika nagrizanja Si tela: a) integrisani taktel, b) profil niza taktela

Karakteristike. Osobina pijezootpornika je da menja otpornost usled deformacije. Na primer, za silicijum p -tipa sečenim u pravcu glavnih osa tipična vrednost elastorezistivnog faktora $m = (\Delta\rho/\rho)/(\Delta l/l)$ je 100–170. Njegova tačna vrednost, kao i njegove temperaturne varijacije, zavise od stepena dopiranja primesa. Membrana je debela svega 10–30 μm , prečnika do 50 μm , ali i pored toga sadrži četiri difundirana pijezootpornika spojena u Vitstonov most. Most je spojen električnom vezom sa čipom u osnovi, koji je povezan na komunikacionu sabirnicu RS-232C. Tipična rezolucija taktela je 0,25×0,25 mm. Standardna matrica sa 32×32 elemenata ima veličinu 10×10 mm, sa frekvencijom očitavanja oko 60 Hz. Na slici 4.30.b prikazan je profil taktelnog niza koji se lepi na prste robota.

Osetljivost otpornosti pijezootpornika na temperaturu je $\partial R/(R \cdot \partial T) = 0,2 - 0,5\%/^{\circ}\text{C}$, tako da uticaj temperature može biti značajan jer je relativna promena otpornosti pri maksimalnom pritisku oko 0,01. Manju temperaturnu zavisnost imaju jako dopirani pijezootpornici, ali se na taj način povećavaju njihove dimenzije. Temperaturna kompenzacija izvodi se programski ili dodatnim kolima.

Integrisani kapacitivni senzor. Deformacija silicijumskog tela (konzole, membrane) može da se detektuje i kao promena kapacitivnosti kondenzatora. Jedna elektroda je od tankog sloja metala na nepokretnoj podlozi (pireks staklo debljine 1–2 mm), a druga je od jako dopiranog p^+ površinskog sloja sa donje strane

membrane (slika 4.31.a). Prečnik membrane je 100–300 μm , debljina je 10–20 μm , a razmak između elektroda 1–5 μm .

U poređenju sa pijezo otpornicima kapacitivni senzori integrisani u silicijum imaju veću osetljivost na pritisak i manje izraženu temperaturnu zavisnost, na primer, $\partial C/(C \cdot \partial T) < 100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Prostorna rezolucija ovakvih taktilnih senzora ograničena je na 0,3–0,5 mm, jer promena kapacitivnosti kondenzatora takvih dimenzija iznosi desetak fF, što je zasad krajnji domet merenja u uslovima smetnji i multipleksiranog načina rada.

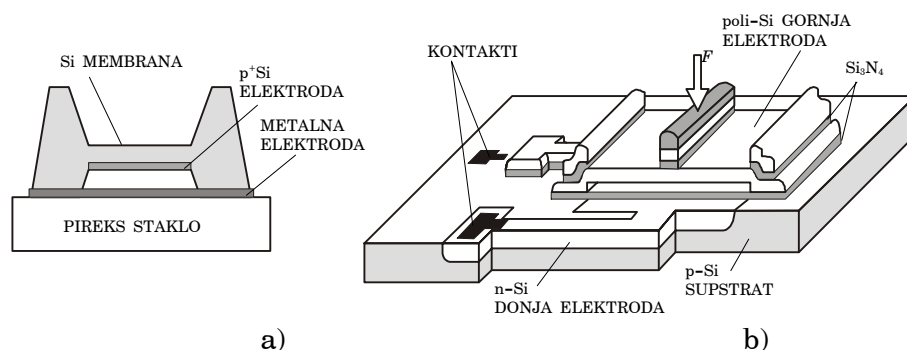
4.8.3. Mikromehanička obrada površinskih slojeva

Tehnika tankih slojeva. Nakon što se u silicijumsku osnovu integriše potrebna mikroelektronika, na površini se deponuje nekoliko polisilicijumskih slojeva ukupne debljine svega nekoliko mikrometara. Ovi slojevi obrađuju se tehnikama mikromehanike – nagrizaju se jedan po jedan sve dok se ne dobije željena struktura na površini: pijezo otpornički most ili kondenzator.

Tankoslojni pijezo otpornici imaju izrazito nelinearnu promenu otpornosti sa deformacijom

$$\frac{\Delta R}{R} = A\varepsilon + B\varepsilon^2, \quad (4.39)$$

gde su A i B konstante. Dobra linearnost postiže se samo u donjem delu opsega. Tako, na primer, u delu 0–0,1 opsega linearnost je $\pm 0,75\%$. Tankoslojni poluprovodnički otpornici imaju faktor osetljivosti $k = (\Delta R/R)/(\Delta l/l)$ veći oko 100 puta u poređenju sa mernim trakama od metala. Izlazni signal sa Vitstonovog mosta od četiri takva otpornika ima relativno visok nivo izlaznog signala, elektronska kola za prilagođavanje signala su jednostavnija, a zbog malih dimenzija moguće je ostvariti visoku prostornu rezoluciju taktilne detekcije od 40×40 elemenata na 1 mm^2 , odnosno $25 \times 25 \mu\text{m}$ po jednom elementu. Zbog zavisnosti otpornosti pijezo otpornika od temperature neophodna je odgovarajuća kompenzacija.



Slika 4.31. Integrirani kapacitivni senzor: a) struktura sa nadograđivanjem, b) struktura sa obradom polisilicijumskih slojeva

Tankoslojni kapacitivni senzori dobijaju se složenijim postupkom u odnosu na obradu kristalnog tela. Na silicijumsku osnovu deponuju se različiti materijali (polisilicijum, SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3), koji se onda selektivno nagriza radi formiranja šupljine kondenzatora. Na silicijumskom p -supstratu obično se prvo difuzijom napravi nepokretna elektroda od jako dopiranih n -primesa (slika 4.31.b). Preko nje se onda nanosi pasivni sloj od silicijum nitrida (Si_3N_4), čija je namena da štiti osnovu od hemijskog procesa kojim se nagriza naredni sloj od fosforsilikatnog stakla. Preko stakla stavlja se sloj polisilicijuma, a onda se staklo rastvori i ukloni. Na taj način dobijena je šupljina koja se premošćava polisilicijumskim slojem kao drugom elektrodom. Sličnim postupkom na mostu se formiraju još tri trake; srednja služi za prenos sile, a dve sa strane namenjene su za učvršćivanje krajeva. Svaki sloj deo je svega $1 \mu\text{m}$, a ukupna debljina nekoliko mikrometara.

4.9. TERMIČKI TAKTILNI SENZORI

4.9.1. Principi gradnje

Termička percepcija okoline omogućava čoveku da oseća temperaturu i da prepozna oblike predmeta. Poznato je da čovek pri dodiru metalnog i drvenog predmeta na sobnoj temperaturi oseća

da je metalni predmet hladniji. Tada se prelaz toplote od radnog predmeta do receptora toplotnog fluksa odvija kondukcijom. Pošto je koeficijent toplotne vodljivosti λ [W/m°C] za metale znatno veći nego za drvo, toplota sa prsta intenzivnije prelazi na metal, površina prsta brže se hladi i nastaje osećaj da je metalni predmet hladniji. Čovek može da detektuje razlike u temperaturi od 1 °C, što odgovara 0,7 mW/cm².

Na isti način rade i veštački termički senzori. Grade se u obliku nizova ili matrica, slično kao taktilni senzori u užem smislu koji su osetljivi na delovanje sile. Osnova na kojoj su ugrađeni senzori obično je zagrejana posebnim izvorom toplote i termostatirana na određenoj temperaturi radi formiranja referentnih radnih uslova.

Kada je senzor u kontaktu sa objektom, nastaje prelaz kondukcijom. Termičko stanje senzora menja se u zavisnosti od geometrije senzora i materijala od kojeg je napravljen, a nastala promena detektuje se kao termička slika objekta. Za objekte od različitog materijala, nejednakih oblika i iste temperature, prelaz toplote kondukcijom je različit, na osnovu čega se objekti mogu sortirati i po obliku i po vrsti materijala.

Kada objekat nije u direktnom kontaktu sa senzorom, nastaje prelaz toplote radijacijom. Objekat tada pravi termičku senku u odnosu na neko referentno zračenje, na osnovu čega se dobija odgovarajuća slika.

Tipovi. Termički senzori za razliku od optičkih (fotonskih) ne reaguju na fotone već na energiju zračenja. Zato termički senzori detektuju znatno širi spektar zračenja, imaju brži odziv i manju osetljivost od optičkih. Apsorbovano zračenje menja toplotno stanje i temperaturu senzora, koja se meri posredno pomoću neke termometarske veličine: termoelektrične sile, termoelektrične otpornosti i dr. U skladu s tim, osnovni termički senzori su:

- bolometar, tj. temperaturno osetljivi otpornik, ređe napravljen od metala, a češće od oksida metala ili od poluprovodnika (termistor) zbog veće osetljivosti, veće nominalne otpornosti i manjih dimenzija;
- termoelement;

- piroelektrik, koji za razliku od ostalih termičkih senzora ima izlaz proporcionalan promeni temperature u vremenu, a ne temperaturi, zbog čega brže reaguje na detektovano zračenje koje se mora skenirati ili naizmenično propuštati.

4.9.2. Termootpornici

Termistor kao termički senzor dodira zbog velike brzine odziva (1–2 s) i malih dimenzija pogodan je za gradnju nizova i matrica sa prostornom rezolucijom do 2 mm. Termistori R_{Ti} ugrađeni su pri samoj površini elastične veštačke kože, čija je termička otpornost približno jednaka srednjoj vrednosti merene termičke otpornosti (slika 4.32.a). Debljina elastičnog sloja $d=3-5$ mm dovoljna je da se omogući dobar kontakt i sa neravnim objektima. Otpornost svih termistora jednaka je na radnoj temperaturi $T_r=25$ °C, koja se postiže pomoću tranzistora snage kao grejača ugrađenog u bakarnu ploču. Informacija o radnoj temperaturi T_r dobija se posebnim termistorom R_{Tr} i na komparatoru se upoređuje sa zadanom vrednosti T_{rz} . Komparator služi kao dvopoložajni regulator temperature T_r , koji uključuje grejač kada je $T_r < T_{rz}$, odnosno isključuje ga kada je $T_r > T_{rz}$.

Čim je radni objekat u kontaktu sa senzorom, dolazi do prelaza toplote sa grejača na objekat, pri čemu pad temperature zavisi od vrste materijala od kojeg je napravljen objekat. Na primer, pad temperature veći je za aluminijum nego za plastiku, pa se objekat od aluminijuma detektuje kao hladniji (slika 4.32.b). Pad temperature od senzora do objekta računa se u relativnom obliku:

$$\delta T = \frac{T_i - T_c}{T_i - T_a} 100 [\%], \quad (4.40)$$

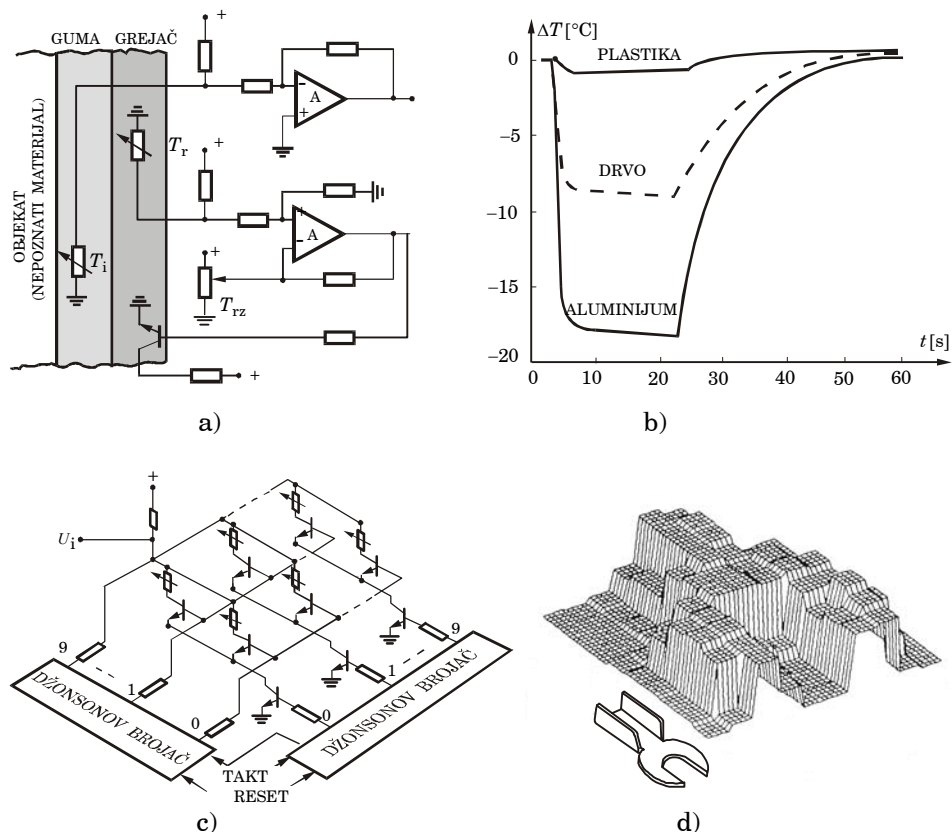
gde su: δT relativna razlika temperature [%], T_i inicijalna temperatura senzora [°C], T_c temperatura senzora nakon kontakta sa objektom [°C] (izmerena posle završetka prelaznih pojava) i T_a ambijentna temperatura [°C].

Očitavanje termistorske matrice slično je kao kod otporničkih taktilnih matrica (slika 4.32.c). Kao multiplekseri mogu da se upotrebe binarni brojači (Džonsonovi kaunteri) koji

preko dva prekidača, tj. na osnovu adrese vrste i adrese kolone uključuje dati termistor na masu. Pad napona

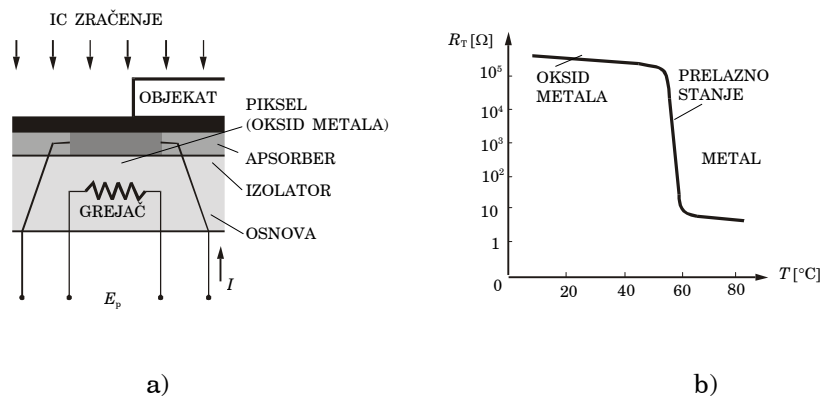
$$U_{ij} = \frac{R_{Tij}}{R + R_{Tij}} U_{ref} \quad (4.41)$$

na delitelju napona proporcionalan je temperaturi taktela T_{ij} . Dobijena termička slika podseća na slike nastale delovanjem kontaktnih sila kod taktilnih senzora. Pojava kondukcije toplote poprečno na smer između kontakta senzora i objekta smanjuje uočljivost ivica i granica između zona različitih materijala od kojih je sačinjen objekat (slika 4.32.d).



Slika 4.32. Termistorski termički senzor dodira: a) konstrukcija, b) prelaz toplote od senzora ka objektu u zavisnosti od vrste materijala objekta, c) multipleksiranje, d) termička slika kontaktne stopice

Tankoslojni termootpornici prave se na bazi oksida metala jer su ovi materijali pogodni za primenu tehnike tankog sloja. Otpornički sloj debljine $3\ \mu\text{m}$ nanosi se fotolitografskim postupkom na osnovu tako da se dobije željeni oblik i matični raspored otpornika. Završni sloj je od metala ili grafita radi pojačanja apsorpcije zračenja i zaštite (slika 4.33.a).



Slika 4.33. Tankoslojni termički senzor: a) način gradnje, b) statičke karakteristike $R_T(T)$ za vanadij-dioksid

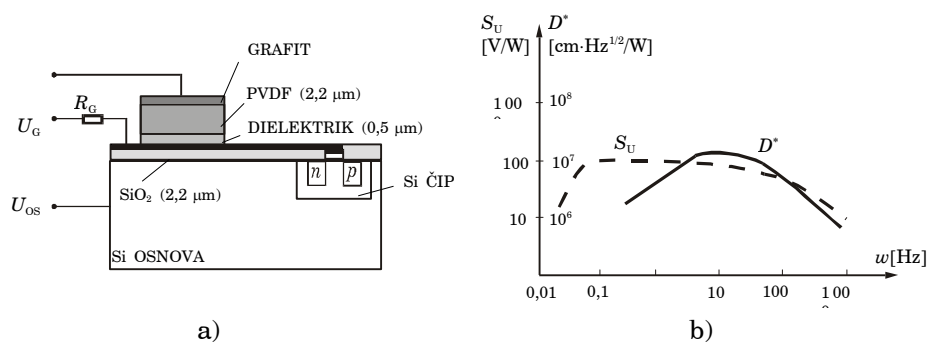
Tankoslojni termički senzor ima brz odziv sa vremenskom konstatom τ od nekoliko pikosekundi i veliku osetljivost $\Delta R/\Delta T$ od skoro pet dekada promene otpornosti pri promeni temperature od desetak stepeni celzijusa. Napon napajanja može se tako podesiti da radna tačka bude na sredini prelaznog dela karakteristike gde je osetljivost najveća.

Na slici 4.33.b prikazana je statička karakteristika vanadijum-dioksida (VO_2), koji ima brz prelaz iz stanja u kome se ponaša kao poluprovodnik ($R_T \approx 10^5\ \Omega$) u stanje u kome se ponaša kao metal ($R_T \approx 5\ \Omega$). Ovom prelazu odgovara promena temperature sa $55\ \text{°C}$ na $65\ \text{°C}$. Pomoću jednosmernog ili naizmeničnog napona napajanja grejača E_p radna tačka podešava se da bude na sredini karakteristike gde je osetljivost najveća. Termootpornik od oksida metala osetljiv je na zračenje u širokom opsegu frekvencija: od x zračenja ($\lambda=10^{-8}$ – 10^{-11} m) do IC zračenja ($\lambda=0,76$ – $40\ \mu\text{m}$). Zavisnost $R_T(\lambda)$ određuje se eksperimentalno, najčešće za referentna zračenja na talasnim dužinama $0,6\ \mu\text{m}$ (laser He-Ne), $1,06\ \mu\text{m}$ (laser Nd-YAG) i $10,6\ \mu\text{m}$ (laser CO_2).

4.9.3. Piroelektrici

Piroelektrični termički senzori prave se od tankog sloja (20–40 μm) polivilidenfluorida (PVDF), natrijum-nitrita (NaNO_2), litijum-tanida (LiTaO_3), triglicin-sulfata (TGS), olovo-cirkonata (PbZrO_3) i olovo-titanata (PbTiO_3). Piroelektrični koeficijent za PVDF iznosi $0,25 \cdot 10^{-4} \text{ C/m}^2\text{K}$, što je za čitav red veličine manje nego za TGS, PbZrO_3 i PbTiO_3 , ali zbog dobrih termičkih osobina (mali koeficijent provođenja toplote) i jednostavnosti izrade PVDF je najpogodniji.

Tanki sloj PVDF 10–30 μm , površine $0,3 \times 0,3$ – $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$, sa gornje strane je presvučen slojem grafita radi poboljšanja apsorpcije IC zračenja. Grafit istovremeno služi i kao zajednička elektroda za sve taktele u matrici (slika 4.34.a). Sa donje strane je dielektrik poliizobutilen (0,5 μm) kao interfejs sa silicijumskim čipom. Aluminijska ili srebrna elektroda debljine 50 nm spojena je na gejt MOSFET impedantnog rastavljača. Predotpor R_G je eksterni otpornik sa vrednošću 10^{10} – $10^{11} \Omega$. Sloj od 2 μm silicijum-dioksida služi kao izolator.



Slika 4.34. Piroelektrični senzor termičke slike: a) integrisani taktel, b) naponska osjetljivost S_U i specifična detektivnost D^* u zavisnosti od frekvencije modulacije

Frekvencija sa kojom se moduliše upadno zračenje ograničena je brzinom električnih i termičkih procesa u taktelu:

$$\omega \leq \frac{1}{2\pi\tau_{el}} \quad (4.42)$$

$$\omega \leq \frac{1}{2\pi\tau_{el}}, \quad (4.43)$$

τ_{el} vremenska konstanta električnih procesa u taktelu i τ_{te} vremenska konstanta termičkih procesa u taktelu. Kada je termički kontakt sa silicijumskim čipom dobar, frekvencija $1/\tau_{te}$ pomera se ka većim vrednostima, tj. prema $1/\tau_{el}$. Tipična vrednost za frekvenciju modulacije je $\omega=20-40$ Hz. Izbor frekvencije ω zavisi od potrebne naponske osetljivosti S_u [V/W] i specifične detektivnosti D^* [cmHz^{1/2}/W], (slika 4.34.b).

4.9.4. Termoelementi

Termoelektrični termički senzor. Prema tumačenju Zebekovog efekta, kada je termoelektrično kolo od dva različita provodnika spojeno na toplom kraju i otvoreno na hladnom kraju, tada na otvorenom kraju nastaje napon

$$U_{AB} = \alpha \Delta T, \quad (4.44)$$

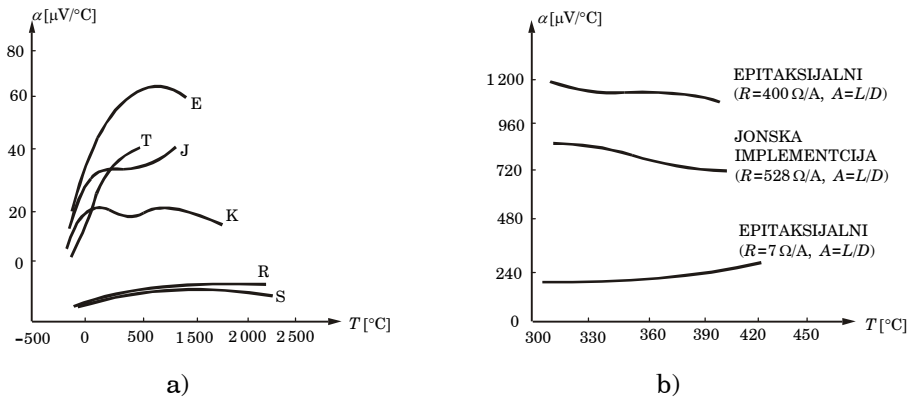
gde su $\Delta T = T_2 - T_1$ [°C] razlika temperatura između toplog i hladnog kraja i α [μV/°C] Zebekov koeficijent koji zavisi od termoelektričnih osobina provodnika A i B.

Ovakvo kolo naziva se termoelement. Statičke karakteristike svih termoelemenata su nelinearne. Samo u malom temperaturnom opsegu Zebekov koeficijent ima konstantne vrednosti (slika 3.35.a). U tabeli 4.1 date su prosečne vrednosti α na temperaturi $T=0$ °C i $T=27$ °C za standardne termoelemente od metala.

Poluprovodnički termoelementi. Mnogo veće vrednosti Zebekovog koeficijenta α imaju poluprovodnici. Termoelektrični efekat javlja se kod poluprovodnika dopiranog određenim primesama ili kod kombinacije dvaju poluprovodnika. Silicijum sa manjom razlikom u koncentraciji između donora i akceptora, tj. sa manjom gustinom pokretnih nosilaca naelektrisanja, ima veći Zebekov koeficijent. Za amorfni silicijum dopiran fosforom (a-Si:P) Zebekov koeficijent je $\alpha = -(0,7-2)$ mV/°C u temperaturnom intervalu 30–550 °C, pri čemu više dopirani a-Si ima manji α .

Tipični termoelement od dva poluprovodnika sastoji se od tankoslojnih traka silicijuma p -tipa i n -tipa spojenih aluminijumskim provodnikom (termoelement Si/Al). Debljina traka

je 1–10 μm . Trake su nanete na osnovu od kvarca (SiO_2) metodom difuzije, jonske implantacije ili epitaksijalnim postupcima. U zavisnosti od koncentracije nečistoća mogu se ostvariti različite vrednosti Zebekovog koeficijenta, pri čemu je otpornost trake 5–2500 Ω/A ($A=L/D$ je aspektni odnos, tj. odnos dužine L i širine D trake). Na slici 4.35.b prikazana je promena Zebekovog koeficijenta za termoelement Si/Al u intervalu 300–450 $^\circ\text{C}$, a u tabeli 4.2 date su vrednosti parametara termičkih senzora, tj. termoelektričnih baterija napravljenih na bazi najpoznatijih poluprovodničkih termoelemenata.



Slika 4.35. Temperaturna zavisnost Zebekovog koeficijenta: a) za standardne termoelemente od metala, b) za termoelement od Si traka

Vremenska konstanta veća je nego kod optičkih (fotonskih) senzora jer se apsorbirana energija prvo pretvara u toplotu, a tek onda se menjaju elektronske osobine strukture materijala. Za praktičnu primenu u tehnici senzora Zebekov koeficijent poluprovodnika može se izraziti kao funkcija električne otpornosti:

$$\alpha = \frac{mk}{q} \cdot \ln \frac{\rho}{\rho_0} \quad [\text{V}/^\circ\text{C}], \quad (4.45)$$

gde su: ρ i ρ_0 specifične otpornosti dopiranog i čistog poluprovodnika na sobnoj temperaturi, $m=2,6$ konstanta, $k=1,38 \cdot 10^{-26} \text{ J}/^\circ\text{C}$ Boltzmanova konstanta i $q=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$ naelektrisanje elektrona. Na primer, za čisti silicijum je $\rho_0=5 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ i $\alpha=220 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, a za dopirani silicijum čija je specifična otpornosti $\rho=10^{-2} \Omega\text{m}$ dobija se da je $\alpha=1200 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

TIP	KOMERCIJALNI NAZIV	MAKSIMALNI OPSEG [°C]	PROSEČNA OSETLJIVOST [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]	$\alpha(0^\circ\text{C})$ [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]	$\alpha(27^\circ\text{C})$ [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]
E	Kromel/konstantan (Ni-Cr/Cu-Ni)	-200 do +900	67,9	57	60
J	Železo/konstantan (Fe/Cu-Ni)	0-750	52,6	50	51
K	Kromel/alumel (Ni-Cr/Cu-Ni)	-200 do +1250	38,8	59	41
R	Platina-13%rodijum/ /platina (Pt-19%Rh/Pt)	0-1600	12,0	5	6
S	Platina-10%rodijum/ /platina (Pt-10%Rh/Pt)	0-1450	10,6	5	7
T	Bakar/konstantan (Cu/Cu-Ni)	-200 do +350	40,5	39	41

Tabela 4.1. Parametri standardnih termoelemenata od metala

TERMO-ELEMENT	BROJ ELEME-NATA	OSET-LJIVOST [V/W]	VREMENSKA KONSTANTA [ms]	OTPORNOST TERMOBATERIJE [Ω]	SPECIFIČNA DETEKTIVNOST [$10^8 \cdot \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$]
Bi/Sb	60	30-50	15-30	20	3
(p)Si/Al	44	10,6	120	50	1,05
(n)poliSi/Au	32	20-25	25	73-82	0,5-0,6
(p)poliSi/Au	32	52-56	25	220-280	0,68-0,73
Te/InSb	54	95	30	500	1,1

Tabela 4.2. Parametri tipičnih poluprovodničkih termobaterija

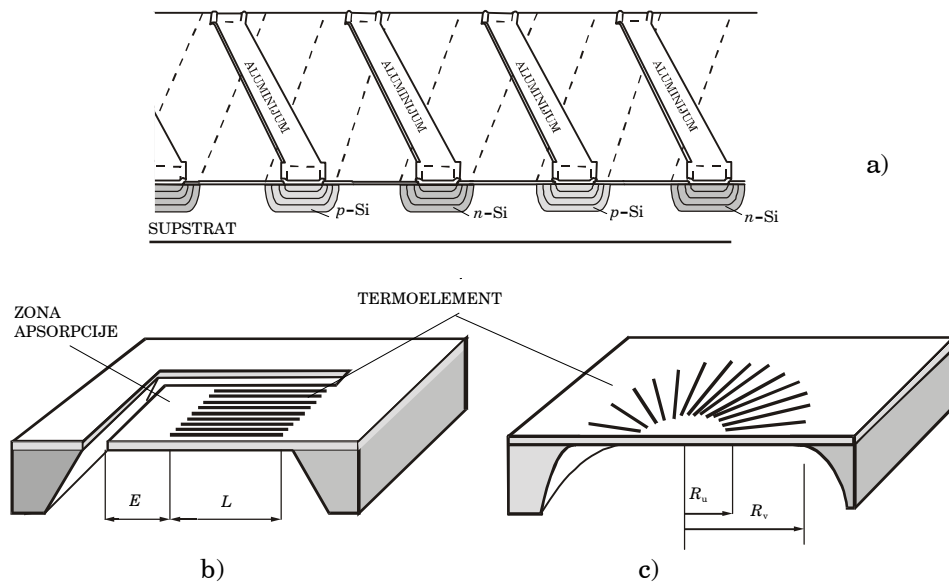
Način gradnje. Osnovni tip senzora termičkog zračenja na bazi poluprovodničkog termoelementa pravi se u obliku traka dva poluprovodnika (slika 4.36.a). Materijal se vakuumski deponuje na izolacioni sloj od SiO_2 ili Si_3N_4 debljine $1\mu\text{m}$, koji je nanet na silicijumsku osnovu. Izolacioni sloj ima mali koeficijent provođenja toplote od toplog prema hladnom kraju. Radi poboljšanja apsorpcije upadnog zračenja u širem području spektra, mesto gde su spojeni topli krajevi (apsorpciona zona) prekriva se tankim

slojem apsorpcionog materijala. Veličina apsorpcione zone je $0,4-1 \text{ mm}^2$.

Termoelementi se povezuju u pravouglu ili kružnu termobateriju (slika 4.36.b,c), koja daje napon

$$U = n\alpha R_{\text{th}} P, \quad (4.46)$$

gde su: n broj elemenata termobaterije, α Zebekov termoelektrični koeficijent poluprovodnika, R_{th} [$^{\circ}\text{C}/\Omega$] termička otpornost termobaterije i P [W] snaga termobaterije (toplotni tok od toplog prema hladnom kraju ekvivalentan snazi apsorbovnog zračenja).



Slika 4.35. Poluprovodnička termobaterija: a) u obliku traka, b) pravouga na konzoli, c) kružna na membrani

Umesto jednačine (4.46) u praksi se češće primenjuje njen jednostavniji oblik:

$$U = kA^{1/2} \cdot P, \quad (4.47)$$

gde konstanta k sadrži parametre poluprovodnika, a konstanta A predstavlja geometrijsku karakteristiku odnos dužine L i širine D termobaterije, odnosno: $A=L/D$. Efektivna dužina senzora F veća je od L za dužinu apsorpcione zone E :

$$F = E + L = E + AD, \quad (4.48)$$

a toplotni tok proporcionalan je površini apsorpcione zone:

$$P = k_1 \cdot ED, \quad (4.49)$$

pa je napon termobaterije:

$$U = kA^{1/2} \cdot P = k \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^{1/2} \cdot k_1 ED = k k_1 ED^{1/2} L^{1/2}. \quad (4.50)$$

Eksperimentima je ustanovljeno da je maksimalna apsorpcija pri $E=(2/3)F$ i $L=(1/3)F$. Kada se ovi podaci uvrste u prethodnu jednačinu, dobija se konačni izraz za proračun napona pravougleg termobaterije:

$$U = 0,38 k k_1 D^{1/3} L^{2/3}. \quad (4.51)$$

Za kružnu termobateriju umesto aspektnog odnosa $A=L/D$ u jednačini (4.47) treba uvrstiti odnos $A=[\ln(R_v/R_u)]/2\pi$, gde su R_v i R_u vanjski i unutrašnji poluprečnik aktivne zone. Snaga upadnog zračenja je $P=k_1 R_u^2 \pi$, pa je generisani napon

$$U = 0,38 k k_1 R_v^2. \quad (4.48)$$

Kružna termobaterija veličine $2R_v=F$ daje približno četiri puta manji napon od pravougleg termobaterije ukupne dužine F . Međutim, kod pravouglog oblika intenzivnija je razmena toplote sa okolinom i zato su gubici veliki – do 1/3 apsorbovanog zračenja. Zbog toga se odnos $E:L=2:1$ koji daje najveći izlazni napon modifikuje na iznos $E:L=1$, a najčešće je $L \approx D=4$ mm.

4.10. UPOREDNI PREGLED

Veštačka taktilna percepcija odnosi se na detekciju normalne sile, momenta klizanja, momenta torzije, 3D-oblika i termičkih svojstava pri fizičkom dodiru sa radnim objektima. Pobuda je distribuirana na kontaktnoj površini, pa se taktilni senzori grade u obliku nizova ili 2D-matrica. U svakoj tački niza/matrice transformiše se pobuda koja deluje u toj tački. U tabeli 4.3 dat je uporedni pregled fizičkih principa na kojima se temelji rad savremenih taktilnih senzora. Svaki od navedenih tipova senzora ima pored dobrih osobina i određene nedostatke,

neki tipovi napravljeni su samo za istraživačke potrebe, neki su u fazi intenzivnog razvoja, tako da je teško reći koji je najbolji.

TIP SENZORA	FIZIČKI OSNOV RADA	DOBRE OSOBINE	NEDOSTACI
OTPORNIČKI a) SA VEŠTAČKOM KOŽOM OD OTPORNIČKOG POLIMERA	Promena otpornosti veštačke kože pri sabijanju.	Jednostavnost konstrukcije, veliki dinamički opseg, visoka prostorna rezolucija, izdržljivost na preopterećenje.	Veliki broj priključnih žica, detekcija samo normalne sile, kontinuiran, ali često nelinearan odziv sa histerezisom.
b) POLUPROVODNIČKI	Promena otpornosti otpornika u Si supstratu.	Visoka rezolucija, kompatibilnost sa VLSI tehnologijom.	Potrebna temperaturna kompenzacija.
KAPACITIVNI a) SA VEŠTAČKOM KOŽOM	Promena razmaka između elektroda zbog sabijanja kože.	Veliki dinamički opseg, visoka prostorna rezolucija, veliki frekventni opseg.	Osetljivost na šumove, osetljivost dielektrika (veštačke kože) na temperaturu.
b) POLUPROVODNIČKI	Promena razmaka između elektroda kondenzatora u silicijumskoj membrani.	Visoka prostorna rezolucija, kompatibilnost sa VLSI tehnologijom (lako očitavanje i obrada signala).	Povećanje rezolucije smanjuje veličinu kondenzatora i mogućnost merenja kapacitivnosti do nekoliko fF.
ELEKTROMAGNETSKI a) INDUKTIVNI	Pomeranje jezgra menja magnetsku vezu između primara i sekundara.	Jednostavnost, robustnost.	Velike dimenzije i niska prostorna rezolucija.
b) MAGNETOREZISTORSKI	Promena otpornosti pomeranjem mikromagneta.	Velika osetljivost i dinamički opseg, mali histerezis.	Osetljivost na smetnje.
c) MAGNETOELASTIČNI	Promena magnetske indukcije delovanjem kontaktne sile.	Mali histerezis i velika osetljivost.	Velike dimenzije i naizmenični napon napajanja.
PIJEZO-ELEKTRIČNI	Kontaktna dinamička sila menja naelektrisanje.	Veliki dinamički i frekventni opseg, dobra mehanička svojstva, dobra prostorna rezolucija.	Otežano razdvajanje pjezoelektričnog od piroelektričnog efekta, inherentno dinamički odziv.
ULTRAZVUČNI	Deformacija veštačke kože moduliše vreme propagacije ultrazvuka.	Velika prostorna rezolucija.	Složena kola za obradu signala.
OPTO-ELEKTRONSKI a) SA	Pomeraj modulira-	Pouzdanost, neosetlji-	Niska prostorna

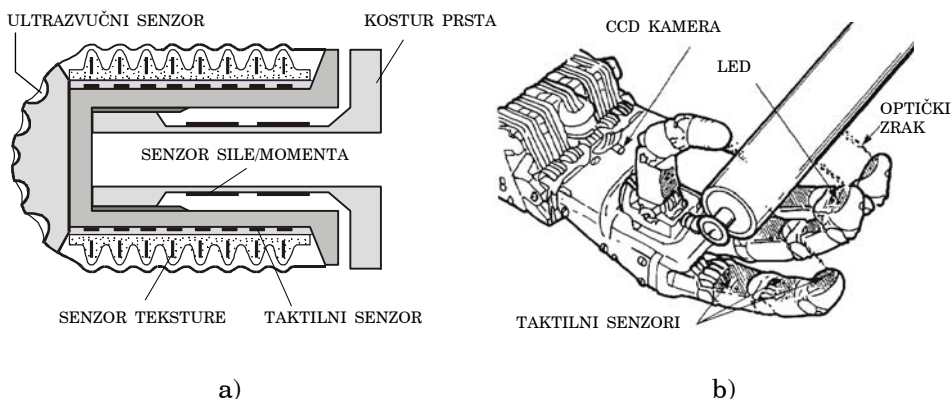
PREKIDANJEM OPTIČKOG SIGNALA	jućeg elementa menja intenzitet svetlosti.	vost na elektromagnetske smetnje, dobra prostorna rezolucija..	rezolucija.
b) SA REFLEKSIJOM OPTIČKOG SIGNALA	Defleksija elastićnog sloja moduliše intenzitet svetlosti.	Dobra prostorna rezolucija, neosetljivost na elektromagnetske smetnje.	Mali dinamićki opseg.
c) SA PLOČASTIM OPTIČKIM PROVODNIKOM	Potpuna unutrašnja refleksija moduliše se ugibanjem profilisanog elastićnog sloja.	Veliki frekventni opseg, visoka prostorna rezolucija, kompatibilnost sa monitorom.	Moguća detekcija samo normalne sile.
TERMIĆKI			
a) TERMISTORSKI	Promena otpornosti sa temperaturom.	Visoka prostorna rezolucija, velika osetljivost.	Otežana gradnja većih matrica.
b) POLUPROVODNICI OD OKSIDA METALA	Promena elektrićne otpornosti sa temperaturom.	Brz odziv, velika osetljivost na uskom opsegu.	Niska prostorna rezolucija.
c) PIROELEKTRIĆNI	Dinamićka promena zraćenja menja el. naboj.	Visoka prostorna rezolucija, veliki frekventni opseg.	Otežano razdvajanje piroelektrićnog od pizeoelektrićnog efekta.
d) TERMOELEMENTI	Promena termoelektrićnog napona sa temperaturom.	Nije potrebno napajanje, lako oćitanje izlaznog napona.	Mali termoelektrićni napon (neophodna termobaterija), loša prostorna rezolucija).

Tabela 4.3. Uporedni pregled taktilnih senzora

U poglavlju su iscrpno razmotreni principi gradnje taktilnih senzora, sadašnje stanje i trendovi razvoja. Na kraju treba istaći da prepoznavanje predmeta ima suštinski znaćaj za fleksibilan i autonoman rad robota. U tom smislu u praksi je veći znaćaj pridavan razvoju i primeni vizisenzora. Kada se predmet nalazi izmeću prstiju robota, vizisenzori su od male koristi. Informacije o obliku, orijentaciji, položaju, hrapavosti i teksturi predmeta tada se mogu dobiti jedino iz taktilne slike.

Taktilni sistemi. Dobre rezultate pokazali su taktilni senzori sa veštaćkom kožom ispod koje su rasporećeni osetljivi detektori deformacije. Zamor elastomera i mogućnost mehanićkog oštećenja usmeravaju istraživanja prema novoj generaciji taktilnih senzora koji se prave tehnikama mikromehanike na silicijumskoj osnovi. Cilj je da se dobiju taktilni senzori veće ćvrstine i boljih karakteristika. Dalji napori ulažu se na obradu i interpretaciju

dobijenih informacija, te na povezivanje i integraciju sa drugim sensorima u celovit sistem.



Slika 4.37. Kombinovani taktilni senzori

Prednosti i mane različitih tipova taktilnih senzora kombinuju se u složen taktilni sistem radi dobijanja potpunije informacije o predmetima u šaci robota. Svaki senzor ima definisanu namenu, ali svi zajedno omogućavaju da se smanje neodređenosti pri kontaktu, da se na pojedine kontaktne oblasti deluje silama različitog intenziteta i dinamike ili da se ostvari drugačija prostorna rezolucija. Na slici 4.37.a prikazan je prst robota na kome se nalaze:

- šestokomponentni senzor, napravljen kao cilindar u osi prsta sa tenzootpornicima, koji služi za merenje rezultantne kontaktne sile/momenta pri manipulaciji sa velikim i teškim predmetima;
- taktilna matrica od pijezoopornika, namenjena za detekciju prostorne distribucije i praćenje sukcesivnih dinamičkih poremećaja;
- dinamički taktilni senzori napravljeni od pijezelektričnog polimera, poredani neposredno ispod površine prsta, a služe za detekciju hrapavosti i teksture površine predmeta;
- ultrazvučni senzori od pijezelektričnog polimera, smešteni na prednjem delu prsta, a služe za generisanje informacije o geometriji predmeta kada se ovaj nalazi u blizini prsta.

Slične funkcije ostvaruje efektna kombinacija senzora na šaci UTAH/MIT opremljene za servisnog robota u vasijskim stanicama (slika 4.37.b).

LITERATURA

1. D.DeRossi: „Artificial tactile sensing and haptic perception“, *Meas. Sci. Technol.*, No.2 (1003–1016), 1991.
2. P.Dario: „Tactile sensing: Technology and application“, *Sensors and Actuators A*, Vol.26, No.1–3 (251–256), 1991.
3. R.H.Sturges: „A quantification of machine dexterity applied to an assembly task“, *The Int. Journal of Rob. Res.*, Vol.9, No.3 (49–62), 1990.
4. P.H.Sydenham, M.M.Vaughan: „Sensor design using rules of knowledge required“, *Measurement*, Vol.8, No.4 (180–187), 1990.
5. M.R.Wolfenbuttel, P.L.Regtien: „Polysilicon bridges for the realization of tactile sensors“, *Sensors and Actuators A*, Vol.26, No.1–3 (257–264), 1991.
6. A.Pugh (ed.): „Robot sensors: Vol.2 – Tactile and non-vision“, IFS (Publications) Ltd. – Bedford and Springer-Verlag, Berlin, 1986.
7. M.Popović: „Senzor i merenja“, Viša elektrotehnička škola, Beograd, 1995.
8. M.Popović: „Senzori taktilne vizije – sadašnje stanje i trendovi razvoja“, *Zbornik V KONFERENCIJA SAUM: Sistemi, Automatsko Upravljanje i Merenja*, str. 79–88, ovi Sad, 1995.
9. A.Ševo, M.Popović: „Sensor matri for tactile sensing“, *Proceedings on VI Conference on Systems, Automatic Control and Measurements SAUM'98*, pp. 108–111, ovi Sad, 1995.
10. A.D.Berger: „Using tactile data for real-time feedback“, *The Int. Journal of Rob. Res.*, Vol.10, No.2 (88–102), 1991.
11. R.S.Fearing: „Tactile mechanisms“, *The Int. Journal of Rob. Res.*, Vol.9, No.3 (3–23), 1990.
12. T.H.Speeter: „A tactile sensing system for robotic manipulation“, *The Int. Journal of Rob. Res.*, Vol.9, No.6 (25–36), 1990.
13. M.Hamid: „A polyconductor beam detector“, *IEEE Trans. on Instrum. Meas.*, Vol.40, No.4 (720–726), 1991.
14. A.W.Herwarden, P.M.Sarro: „Thermal sensors based on the Seebeck effect“, *Sensors and Actuators A*, Vol.10, No.3–4 (321–346), 1986.

15. B.Ploss, S.Bauer: „Characterization of materials for integrated pyroelectric sensors“, *Sensors and Actuators A*, Vol. 26, No.1–3 (407–411), 1991.
16. R.A.Grupen, T.C.Henderson, I.D.McCammon: „A survey of general-purpose manipulation“, *Int. Journal of Rob. Res.*, Vol.8, No.1 (38–62), 1989.
17. R.A.Russel: „A thermal sensor array to provide tactile feed-back for robots“, *Int. J. Rob. Research*, Vol. 4, No.3 (35–39), 1986.
18. R.S.Fearing, J.M.Holerbach: „Basic solid mechanics for tactil sensing“, *Int. J. Rob. Research*, Vol. 4, No.3 (40–54), 1985.
19. H.R.Nichols, M.H.Lee: „A survey of robot tactile sensing technology“, *Int. J. Rob. Research*, Vol. 8, No. 4 (3–30), 1989.
20. D.McFalls, E.Franke: „A robotic assistant for space station freedom“, *Robotics Today*, Vol.2 No.2 (3–6), 1989.
21. D.DeRossi, L.Lazzeri, C.Domenici, A.Nannini, P.Basser: „Tactile sensing by an electromechanochemical skin analog“, *Sensors and Actuators*, No.17 (107–114), 1989.
22. R.C.Dorf: „*International encyclopedia of robotics*“, John Wiley & Sons, N-Y, 1986.
23. C.Kowalski: „Silicon seceeds in touch sensing“, *Robotics Today*, 29–32, april 1989.

5

SENZORI ULTRAZVUČNE VIZIJE

5.1. PRINCIPI GRADNJE

5.1.1. Ultrazvučna percepcija

Definicija. Dobijanje slike pomoću ultrazvučnih senzora naziva se ultrazvučnom percepcijom. U prirodi postoje organizmi kod kojih je vizija sveta bazirana na ultrazvuku. Takav je slučaj kod slepih miševa. Eksperimentima je potvrđeno da slepi miš veoma uspešno leti u prostoriji koja je isprepletana tankim žicama.

Veštačka ultrazvučna percepcija primenjuje se u medicini, metalurgiji, ali je najviše razvijena u robotici. Pomoću ultrazvuka stvara se slika koja sadrži informacije o poziciji, obliku i orijentaciji predmeta. Stacionarnom robotu ove informacije potrebne su radi prepoznavanja određenog predmeta i navođenja hvataljke, a mobilnom robotu radi prepoznavanja prepreka i navođenja na putu do zadate pozicije.

Ultrazvučna percepcija zasniva se na merenju rastojanja od robota do predmeta pomoću ultrazvučnih senzora. Realni predmeti su trodimenzionalni, pa se merenje mora provesti u svim tačkama prostora. Okolina se snima pokretanjem matrice senzora u različitim pravcima ili se senzori uključuju po nekom redosledu radi usmeravanja ultrazvuka. U prvom slučaju reč je o mehaničkom, a u drugom o elektronskom skeniranju.

Ultrazvučna viziju ima sličnu namenu kao i optička. U uslovima sanjene vidljivosti daje bolje rezultate od optičke, ali je od nje inferiornija zbog slabije rezolucije i problema sa kontrolom ultrazvučnog signala.

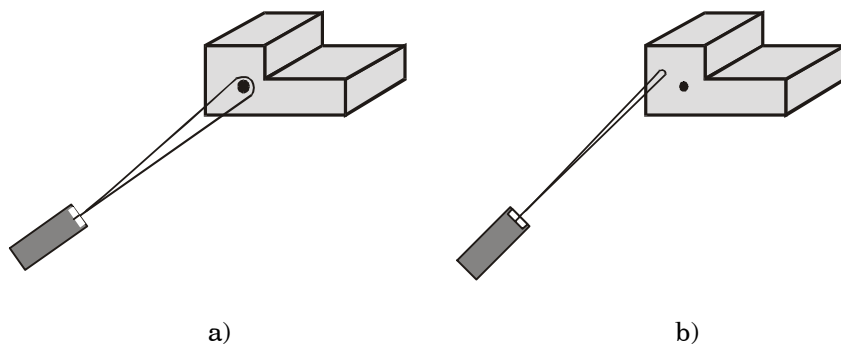
5.1.2. Tehnika i tačnost merenja rastojanja

Rastojanje x između robota i predmeta meri se metodom TOF, tj. kao vreme t koje je potrebno ultrazvučnom talasu da pređe od odašiljača do objekta i nazad do prijemnika: $x=ct/2$.

Brzina prostiranja talasa c nije konstantna već zavisi od temperature i vlažnosti vazduha. Turbulencije, strujanja i temperaturne fluktuacije prenosnog medija remete kvalitet slike. O načinima korekcije bilo je govora u poglavlju o ultrazvučnim proksimiti sensorima.

Za tipičnu radnu frekvenciju 10–200 kHz opseg merenja je 0,3–10 m, pri čemu je donja vrednost ograničena dimenzijama senzora a gornja slabljenjem talasa.

Ultrazvučni talas širi se po konusu sa prostornim uglom $5\text{--}10^\circ$. Širina snopa ultrazvučnog talasa bitna je za rezoluciju merenja. Širi snop pokriva veću površinu predmeta, pa je teško izdvojiti ispupčenja i udubljenja na objektu. Uži snop omogućava jasnije izdvajanje detalja (slika 5.1). Rasipanje talasa i ultrazvučne energije smanjuje se parabolikim ili levkastim usmerivačima, ali su tada dimenzije senzora znatno veće. Rezolucija sa kojom se meri vreme preleta talasa od emitera i nazad do prijemnika je $0,1\ \mu\text{s}$ čemu odgovara rezolucija merenja rastojanja od 0,1 mm.



Slika 5.1. Širina ultrazvučnog snopa i rezolucija merenja

Slično kao i kod ultrazvučnih proksimiti senzora, na tačnost merenja odražava se i međusobni uticaj reflektovanih talasa dvaju susednih senzora. Zato se emitovanje niza ultrazvučnih senzora provodi sa izvesnom faznom ili vremenskom zadržkom, što

omogućava svakom pojedinom senzoru u nizu da prepozna i izdvoji svoj reflektovani signal.

5.1.3. Tehnike prepoznavanja

Za prepoznavanje okoline pomoću ultrazvučnih senzora primenjuje se tehnika slike ili tehnika karakterističnog odziva.

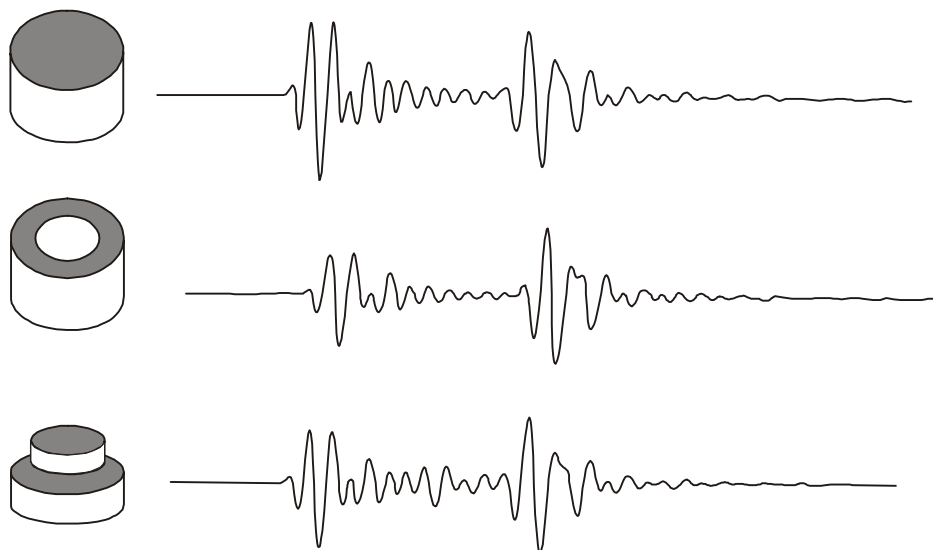
Tehnika slike. Ultrazvučnim primopredajnicima skenira se okolina i TOF postupkom meri rastojanje do predmeta. Zbog rasipanja ultrazvučnog snopa ova metoda ograničena je na manja rastojanja od nekoliko metara. Programi za analizu slike prilagođeni su konkretnoj nameni. Na primer, mobilnom robotu takvi programi omogućavaju da odredi konture predmeta (prepreka), način obilaska (lokalni put duž perimetra prepreke) i optimalnu putanju u odnosu na krajnji cilj kretanja.

Koeficijent refleksije ultrazvuka jako zavisi od razlike akustičnih impedansi između dva medijuma: $z = \rho c$ [kg/m²s]. Slike dobijanje kombinacijom TOF merenja i skeniranja pri promeni koeficijenta refleksije na kontaktu između prenosnog medijuma i predmeta primenjuju se u robotici, medicinskoj dijagnostici i defektoskopiji.

Tehnika karakterističnog odziva. Druga tehnika prepoznavanja temelji se na činjenici da svaki objekat reflektuje ultrazvuk na specifičan način koji zavisi od njegovog oblika. Za odabranu geometriju primopredajnika i definisanu ultrazvučnu pobudu, dobijeni eho upoređuje se sa referentnim eho signalima bilo u frekventnom bilo u vremenskom domenu. Poređenjem se mogu prepoznati predmeti određenog oblika ili istog oblika a različite orijentacije. Na slici 5.2 ilustrovano je prepoznavanje na osnovu vremenskog zapisa eho signala za tri objekta sa malim razlikama u obliku.

Računarski sistemi ultrazvučne vizije. Ultrazvučni sistemi vizije zbog svoje složenosti povezuju se sa mikroračunarom. Preko multipleksera uključuje se odgovarajući predajnik da emituje ultrazvučni impuls – sinusnog ili nekog modulisanog oblika. Reflektovani ultrazvučni talas sa objekta detektuje se odgovara-

jućim prijemnikom, prosleđuje do pretpojačavača, a zatim preko oklopljenog koaksijalnog kabla do programabilnog pojačavača i A/D pretvarača. Na kraju, signal se zapisuje u memoriju i analizira kada se prikupe signali sa ostalih prijemnika.



Slika 5.2. Tehnika upoređivanja vremenskih odziva

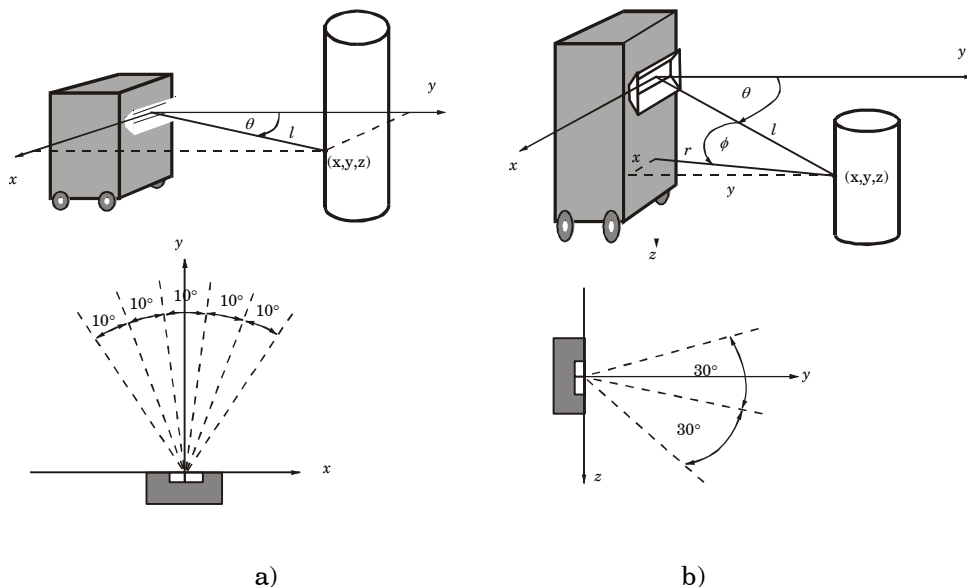
5.2. MEHANIČKO SKENIRANJE

Princip mehaničkog skeniranja zasniva se na sinhronizovanom zakretanju predajnika i prijemnika u horizontalnoj i vertikalnoj ravni pomoću dva step motora kojima upravlja računar. Koliki će uglovi zakretanja biti zavisi od veličine prepreke, konfiguracije prostora u kome se robot kreće i karakteristika primopredajnika.

Prepreka viša od robota. Visoku prepreku robot treba da obide, a samo u specijalnim slučajevima da prelazi preko nje. Zato je za detekciju takvih prepreka dovoljno skeniranje u horizontalnoj ravni (slika 5.3.a). Tipični vidni ugao robota u horizontalnoj ravni je 50° , a ugao širenja emitovanog ultrazvučnog talasa je 10° . Da bi se prekrilo celo vidno polje, neophodno je da se primopredaja ultrazvuka omogući u pet različitih pozicija. Pozicioniranje primopredajnika sa visokom tačnošću provodi se pomoću step motora. Osa y usmerena je u čeonom pravcu robota. Vreme propagacije ultrazvučnog talasa od predajnika do prijemnika dobija se brojanjem takt impulsa, a koordinate prepreke računaju se iz sistema jednačina:

$$\begin{aligned} l &= ct/2 \\ x &= l \cdot \sin \theta = (ct/2) \cdot \sin \theta \\ y &= l \cdot \cos \theta = (ct/2) \cdot \cos \theta, \end{aligned} \quad (5.1)$$

gde su c brzina ultrazvuka u vazduhu na sobnoj temperaturi, l udaljenost prepreke i x, y koordinate prepreke u horizontalnoj ravni.



Slika 5.3 Mehaničko skeniranje: a) prepreka viša od robota, b) prepreka niža od robota

Prepreka niža od robota. Kada je prepreka niža od visine na kojoj je montiran primopredajnik, neophodno je skeniranje i u

vertikalnoj ravni (slika 5.3.b). Ako je širenje ultrazvučnog talasa u vertikalnoj ravni 30° , dovoljne su dve pozicije za primopredaju ultrazvuka. Neka je osa z usmerena prema dole, tada se koordinate prepreke u horizontalnoj ravni računaju na sledeći način:

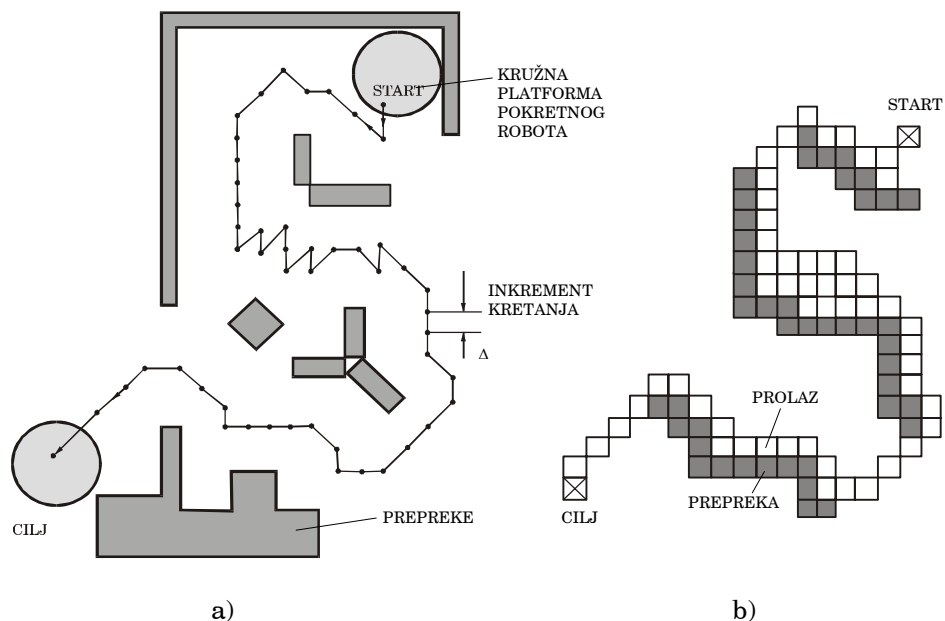
$$\begin{aligned} l &= ct/2 \\ r &= l \cdot \cos \phi \\ x &= r \cdot \cos \theta = (ct/2) \cos \phi \cdot \cos \theta \\ y &= r \cdot \sin \theta = (ct/2) \cos \phi \cdot \sin \theta, \end{aligned} \tag{5.2}$$

gde su: l rastojanje između primopredajnika i prepreke, r rastojanje primopredajnika i prepreke u horizontalnoj ravni xy , a ϕ ugao emitovanja u vertikalnoj ravni između pravaca l i r .

Nedostatak mehaničkog skeniranja je relativno dugo vreme potrebno za kompletiranje cele slike prostora (oko 10 s). Najvećim delom (85%) to vreme otpada na kontrolu i pozicioniranje motora. Senzorski uređaj zajedno sa motorima relativno je velik, pri čemu vibracije motora stvaraju šumove koji utiču na kvalitet slike. Ovi nedostaci prevazilaze se elektronskim skeniranjem.

Strategija kretanja i prepoznavanje okoline. Za kretanje robota je važno prepoznavanje prepreke, a ne samo određivanje njenog položaja. U tom smislu razvijaju se algoritmi koji na osnovu karaktera reflektovanog signala određuju vrstu prepreke: ravan zid, ćošak sa obadva vidljiva zida, ćošak sa jednim vidljivim zidom, žica/šipka i dr.

Na slici 5.4 prikazana je trajektorija kretanja robota između relativno složenih prepreka. Pomoću ultrazvučnih senzora robot skenira okolinu, određuje tip prepreke, definiše pravac kretanja i zatim napreduje u tom smeru za određeni inkrement Δ . Kada stigne u novi položaj postupak se ponavlja. Brzina sa kojom se robot kreće ograničena je na iznos Δ/t_{\min} , gde je t_{\min} najmanje vreme za koje senzor može da emituje i detektuje reflektovani ultrazvučni talas, pri definisanom pragu detekcije.



Slika 5.4. Kretanje u prostoru: a) trajektorija, b) 2D-prikaz okoline na monitoru pri kompletiranju trajektorije

5.3. ELEKTRONSKO SKENIRANJE

5.3.1. Princip

Sušтина elektronskog skeniranja sastoji se u takvoj pobudi niza (ili matrice) predajnika da ultrazvučni talasi u jednom određenom pravcu superponiraju i formiraju jedinstven front širenja. Vremensko kašnjenje u pobuđivanju predajnika mora da odgovara razlici puteva pri širenju parcijalnih talasa. Na primer, za jednodimenzionalno skeniranje (skeniranje u jednoj ravni), primenjuje se niz predajnika na međusobnom rastojanju d . Kada se predajnici sukcesivno uključuju sa kašnjenjem od

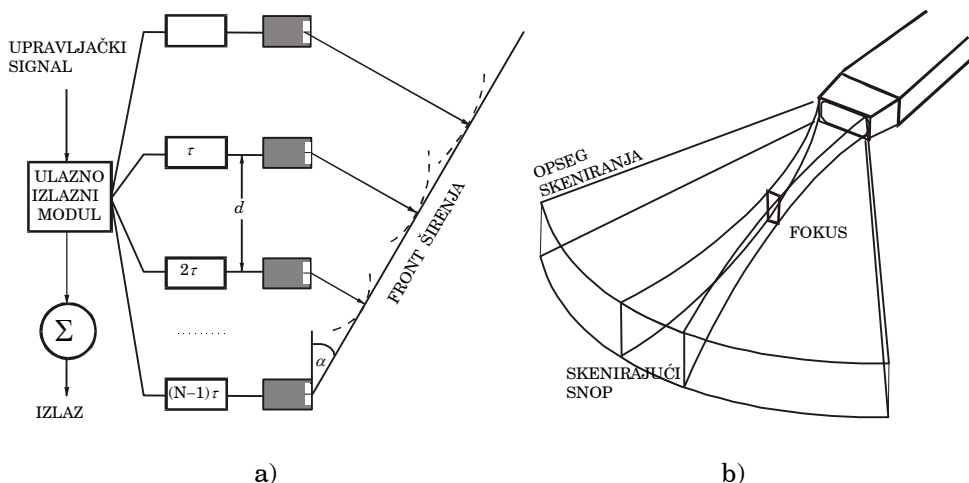
$$\tau = d \cdot \sin \alpha / c \quad (5.3)$$

u odnosu na prethodni, nastaje ravanski talasni front koji se širi pod uglom α (u odnosu na niz senzora (slika 5.5.a). Uključivanje poslednjeg predajnika u nizu je

$$\tau_N = (N - 1) \cdot d \sin \alpha / c = (N - 1) \tau \quad (5.4)$$

sekundi nakon prvog.

Sa porastom vremena kašnjenja u pobuđivanju predajnika jedinstveni talasni front menja smer prostiranja u opsegu $\pm 45^\circ$ u odnosu na osu simetrije. Vreme τ je malo – svega nekoliko nanosekundi i mora da se kontroliše pomoću mikroprocesora za svaki predajnik. U narednom ciklusu senzori rade kao prijemnici i detektuju reflektovani signal sa objekta. Kada je objekat na osi simetrije i na velikoj udaljenosti, eho se detektuje istovremeno u svim prijemnicima. Međutim, kada je objekat izvan ose pod uglom α , tada bez obzira na udaljenost eho dolazi do svakog prijemnika u različito vreme. Mikroprocesor zato postavlja odgovarajuće vrednosti u linije za kašnjenje, pa se u izlaznom modulu formira jedinstveni eho signal kao suma parcijalnih signala.



Slika 5.5 Elektronsko skeniranje: a) princip jednodimenzionalnog skeniranja, b) ultrazvučni skener

Na slici 5.5.b prikazan je ultrazvučni skener sa jednim nizom primopredajnika. Za pretraživanje celog radnog prostora potrebna je matrica primopredajnika koji se uključuju sa određenim faznim pomakom da bi se jedinstveni talasni front usmerio u željenom

pravcu prilikom emitovanja, odnosno da bi se formirao jedinstveni eho prilikom prijema.

Nedostaci elektronskog skeniranja su greške pri postavljanju vrednosti kašnjenja, nepodudarnosti tehničkih karakteristika primopredajnika, greške pri ugradnji (pozicioniranju) predajnika u niz, slaba rezolucija i relativno velika obrada signala. Zahvaljujući, međutim, eleganciji principa elektronskog skeniranja i tehnološkom napretku izrade, ovaj tip ultrazvučne vizije ima veliku perspektivu.

5.3.2. Pojednostavljeno elektronsko skeniranje

Princip rada. Elektronika koja omogućava uključivanje niza ultrazvučnih predajnika sa određenim faznim kašnjenjem osnovni je razlog da se primenjuju jednostavnije verzije elektronskog skeniranja. Interesantan metod razvijen je za automatsku nedestruktivnu analizu defekata u metalnim predmetima. Ultrazvuk se, inače, odavno upotrebljava u defektoskopiji. U klasičnim strukturama obično je primopredajnik fiksiran na nekoj udaljenosti od pokretne trake na kojoj su ispitivani predmeti (slika 5.6.a). Amplituda talasa reflektovanog sa zadnje površine manja je nego amplituda talasa reflektovanog sa prednje površine objekta. Vazdušne šupljine ili nehomogenosti metala menjaju akustičnu impedansu i tada eho ima još manju amplitudu.

Jednostavan primer modifikovanog elektronskog skeniranja primenjen za nedestruktivnu analizu bazira se na jednom predajniku i tri prijemnika ultrazvuka (slika 5.6.c). U prvoj etapi predajnik emituje ultrazvučni impuls prema ispitivanoj oblasti. U drugoj etapi primaju se i zapisuju oblici eho signala $S_1(t)$, $S_2(t)$ i $S_3(t)$ i određuje vreme od početka emitovanja talasa do prijema eho signala:

$$t_1 = (l_1 + l_2) / c \quad (5.5)$$

$$t_2 = 2l_2 / c \quad (5.6)$$

$$t_3 = (l_2 + l_3) / c, \quad (5.7)$$

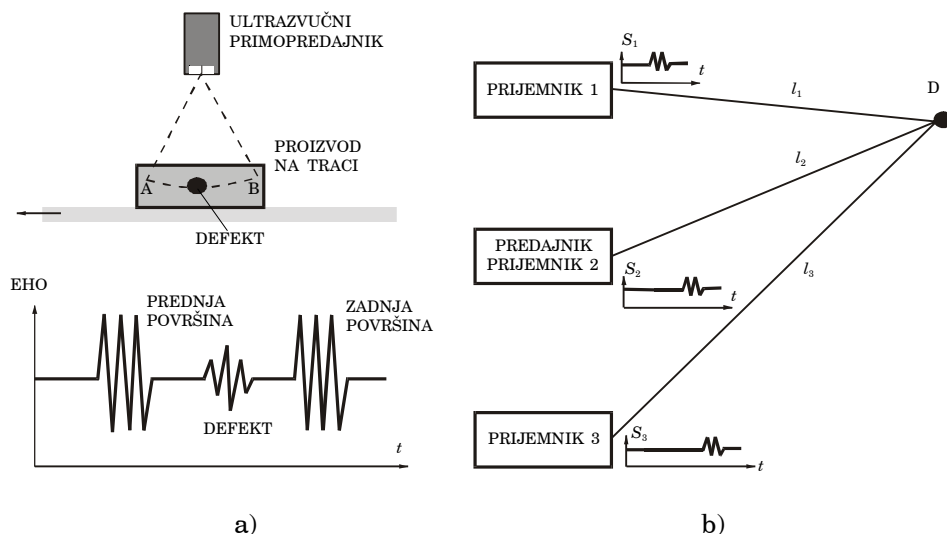
gde su l_1, l_2 i l_3 rastojanja između defekta D i pojedinih prijemnika, a c brzina ultrazvuka kroz medijum (vazduh). U trećoj etapi u signale prijemnika 1 i 3 uvode se kašnjenja t_2-t_1 i t_2-t_3 i formira sumarni signal:

$$R_2(t) = S_1(t - (t_2 - t_1)) + S_2(t) + S_3(t - (t_2 - t_3)), \quad (5.8)$$

koji predstavlja ukupni intenzitet prijema za tačku $D(l_1, l_2, l_3)$. Indeks 2 označava da je prijemnik 2 referentni. Maksimalna vrednost $R_2(t)$ za tačku D je za $t=t_2$:

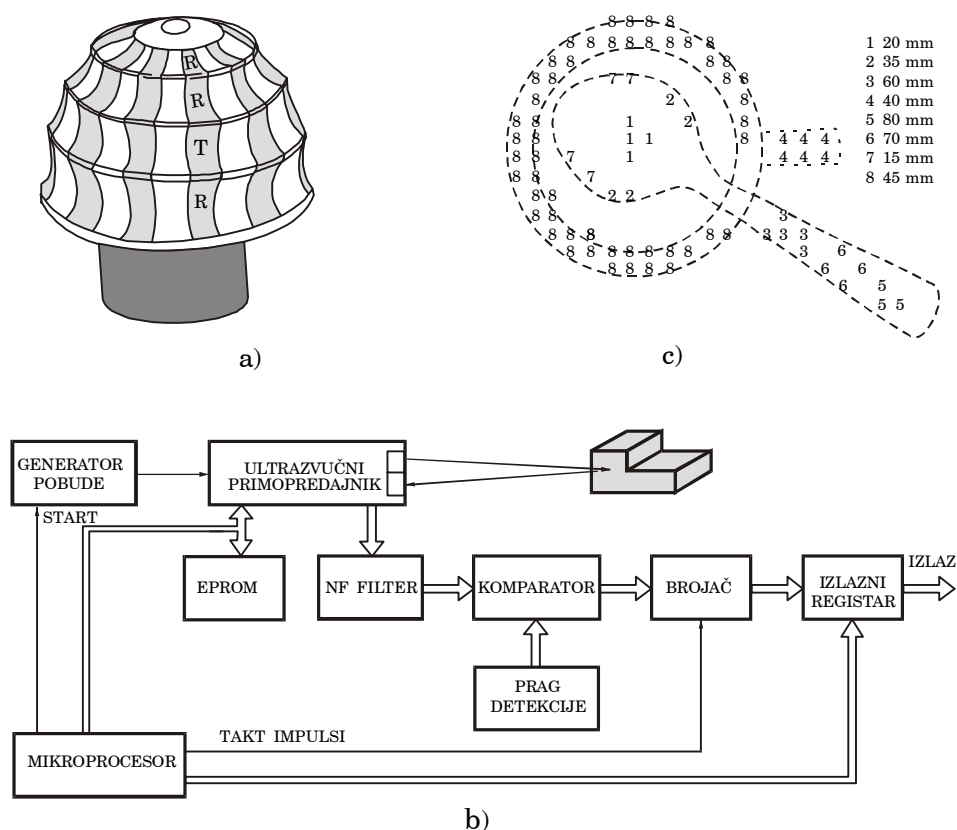
$$R_2(t_2) = S_1(t_1) + S_2(t_2) + S_3(t_2). \quad (5.9)$$

Važna osobina ovakvog načina ultrazvučne detekcije je visok odnos signal/šum, jer se nekolerisani šumovi i signali sa neke druge lokacije ignorišu zahvaljujući redundantnim prijemnicima i slučajnim vrednostima faznog pomaka. Raspored prijemnika je takav da njihove radijacione slike prekrivaju što veće područje. Značajno poboljšanje dobija se kada su predajnik ili cela struktura pokretni duž trake na kojoj su kontrolisani proizvodi, čime se dobija njihova 2D-slika u odgovarajućoj ravni. Programski se može definisati pretraživanje na nekoj dubini ispod površine, odnosno takvim sukcesivnim ponavljanjem sloj po sloj realizuje se 3D-slika predmeta i njegovih defekata.



Slika 5.6. Nedestruktivna analiza ultrazvukom: a) standardni način, b) princip jednostavnog elektronskog skeniranja

Ultrazvučni senzor 3D-oblika takođe radi na principu pojednostavljenog elektronskog skeniranja. Senzor je ugrađen na vrhu prsta robota i sastoji se od 12 modula sa jednim odašiljačem (T) i tri prijemnika (R). Osnova modula je aluminijumska traka zavijena prema obliku prsta (slika 5.7.a). Na osnovu je tehnikom tankog sloja nanet pijezelektrični polimer PVDF. Emitovanje i prijem ultrazvuka odvija se u ravni koja prolazi kroz pripadni modul i osu prsta. Orijehtacija reflektujuće površine na objektu računa se triangulacionim postupkom iz mernih podataka za svaki par T-R i tri različite tačke na površini objekta.



Slika 5.7. Primer 3D-ultrazvučnog senzora: a) konstrukcija, b) blok-šema elektronskog modula, c) rekonstrukcija objekta

Nakon uključivanja generatora visokofrekventne pobude po nekom redosledu daju se adrese za selekciju para T-R. (slika 5.7.b). Identifikacija i koordinate odašiljača i prijemnika kontrolišu se

programom u memorijskom bloku EPROM. Signal iz prijemnika propušta se prvo kroz uskopojasni filter na rezonantnoj frekvenciji prijemnika, a zatim poredi se definisanim pragom detekcije eho signala. U trenutku kada se dostigne zadati prag, brojač završava sabiranje referentnih takt impulsa. Rezultat sabiranja je vreme preleta ultrazvuka od emitovanja do prijema. Ova informacija prosleđuje se do izlaznog registra, a zatim se posebnim program rekonstruiše oblik predmeta.

Na slici 5.7.c prikazan je rezultat rekonstrukcije oblika šoljice u kojoj se nalazi kašika. Prst robota pomera se na fiksiranoj visini od 25 cm. Kada se detektuje prisustvo šoljice, počinje skeniranje sa rezolucijom od 2–5 mm po vertikalnoj osi.

5.4. POVEĆAVANJE TAČNOSTI MERENJA

Tačnost merenja. Osnov ultrazvučne vizije je merenje udaljenosti x između primopredajnika i tačaka objekta: $x=cT/2$. Tačnost merenja rastojanja x zavisi od poznavanja c i procene T . Vrednost brzine prostiranja ultrazvuka c dobro je poznata i njene varijacije zbog temperature lako se kompenzuju. Echo signal, međutim, detektuje se sa izvesnim kašnjenjem τ , odnosno tek kada njegova amplituda dostigne prethodno definisanu vrednost – prag osetljivosti (slika 5.8.a). Zbog toga je x veće nego što stvarno jeste. Greška bi se mogla lako popraviti da je vreme kašnjenja konstantno. Ali nije, jer amplituda prijemnog signala a ne zavisi samo od vremena t već i od rastojanja x .

Ultrazvuk se obično emituje kao harmonijski signal kratkog trajanja, pa odjek ima oblik kao na slici 5.8.a. Promenu amplitude odjeka u funkciji vremena dobro opisuje jednačina:

$$a(t) = A_0 t^m \cdot e^{-t/h} \cdot \cos(\omega_c t + \theta), \quad (5.10)$$

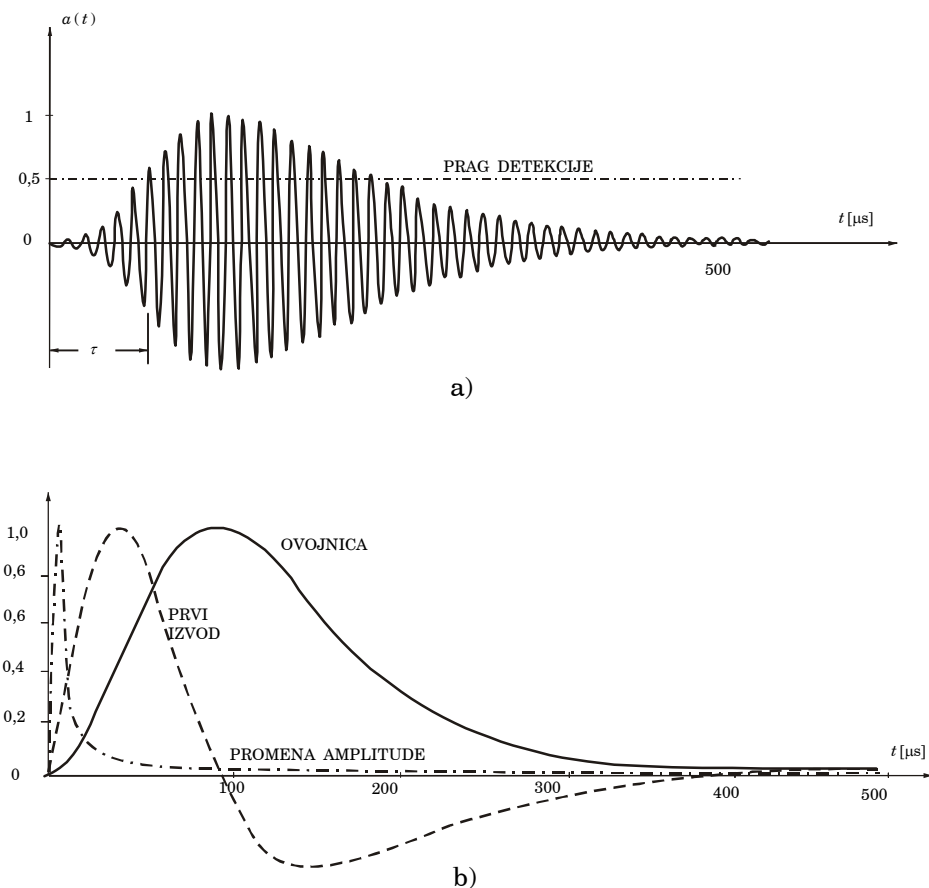
gde je A_0 amplituda emitovanog impulsa ultrazvučnih oscilacija kružne frekvencije ω_c . Faktor t^m opisuje ovojnicu (anvelopu) oscilacija pri porastu amplitude ($m=1-3$), a faktor $e^{-t/h}$ opisuje pri

opadanju amplitude (h i θ su konstrukcione konstante primopredajnika).

Promena amplitude sa udaljenošću x od objekta teško se analitički predstavlja jer treba uzeti u obzir konusno širenje ultrazvuka, apsorpciju od strane medijuma, veličinu i orijentaciju objekta. Za približnu procenu zavisnosti amplitude od udaljenosti služi jednačina

$$a(x) = \frac{A_0 e^{-\alpha x}}{x}, \quad (5.11)$$

gde je α koeficijent slabljenja amplitude ultrazvučnog talasa u vazduhu.



Slika 5.8. Eho: a) oblik signala, b) normalizovana ovojnica, prvi izvod i relativna varijacija amplitude eho signala

Kumulativna greška merenja udaljenosti x zbog nekompenzovanog kašnjenja procenjuje se pomoću jednačine

$$\varepsilon = \left(\frac{T_r}{2} + \delta T_r \right) \cdot c, \quad (5.12)$$

pri čemu je sa polovinom vremena porasta ($T_r/2$) signala $a(t)$ uzet u obzir uticaj navedenih faktora na kašnjenje, a sa δT_r , ($0 \leq \delta \leq 1$), uticaj šuma. Greška ε veća je od talasne dužine ultrazvuka i iznosi do nekoliko centimetara. Ova greška prisutna je kod svakog merenja udaljenosti metodom TOF. Kako je za obradu signala kod ultrazvučne vizije neophodan računar, prirodno je da se ti resursi iskoriste i za korekciju greške ε .

Metoda korekcije. Postoji više načina određivanja početka eho signala $a(t)$, na primer pomoću detekcije maksimuma ovojnice u trenutku $t=mh$. Međutim, u okolini maksimuma promene amplitude relativno su male, tako da i neveliki impulsi šuma doprinose netačnoj detekciji maksimuma (slika 5.8.b).

Najveća promena amplitude je na početku u $t=0$, ali je odnos S/N tu nepovoljan. I pored toga ovo mesto je najpogodnije jer je pri digitalnoj obradi moguće diskretizovati signal u većem broju tačaka i na osnovu toga odrediti njegov početak. Oblik signala za dati prijemnik nije toliko bitan kada je merenje nepoznate distance x relativno, tj. u odnosu na referentni objekat za koji je utvrđena apsolutna udaljenost i oblik eho signala. Proračun početka signala tada se svodi na traženje vrednosti kašnjenja za koji se dobija maksimalna sličnost između referentnog i aktuelnog signala. Ovaj postupak provodi se u tri etape.

U prvoj etapi određuje se ovojnica referentnog signala i čuva u memoriji kao niz uzoraka $r(k)$, za $k \leq N$.

U drugoj etapi određuje se ovojnica aktuelnog eho signala kao niz uzoraka $e(k)$, za $k \leq M$. Izdvajanje niskofrekventne ovojnice iz visokofrekventnog signala provodi se na sledeće načine:

- *Detekcijom vrhova*, pri čemu niz $e(k)$ prvo ispravi, a zatim se vrhovi amplituda spoje metodom interpolacije.
- *Metodom najmanjih kvadrata*, za čije je provođenje neophodno da se eho prvo napiše u obliku:

$$\begin{aligned} a(t) &= u(t) \cdot \cos(w_c t + \theta) = u_1 \cdot \cos w_c t + u_2 \cdot \sin w_c t = \\ &= u_1 x + u_2 y, \end{aligned} \quad (5.13)$$

gde su $u(t) = A_0 t^m e^{-t/m}$, $u_1 = u(t) \cos \theta$, i $u_2 = -u(t) \sin \theta$. U okolini koordinatnog početka, tj. za malo t , amplituda $u(t)$ menja se približno po pravcu $u(t) = A_0 t$. Uzorak eho signala u intervalu $[0, t]$ sada se može napisati u obliku:

$$\alpha_i(t) = u_1 \cdot \cos w_c t_i + u_2 \cdot \sin w_c t_i = u_1 x_i + u_2 y_i. \quad (5.14)$$

Iz uslova za minimum sume kvadrata $\sum (\alpha_i - u_1 x_i - u_2 y_i)^2$ za $2N+1$ uzoraka, od $i=k-N$ do $i=k+N$, amplitude u_1, u_2 i u mogu se predstaviti u obliku:

$$u_1 = \frac{\sum x_i y_i \sum a_i y_i - \sum a_i x_i \sum y_i^2}{(\sum x_i y_i)^2 - \sum x_i^2 \sum y_i^2}, \quad (5.15)$$

$$u_2 = \frac{\sum a_i x_i - u_1 \sum x_i y_i}{\sum x_i y_i}, \quad (5.16)$$

$$u(k) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}. \quad (5.17)$$

- *Hilbertovom transformacijom*, sa kojom se dosta eksperimentiše zbog mogućnosti razdvajanja uzajamno interferentnih eho signala.

U trećoj etapi proračuna kašnjenja između merenog i referentnog eho signala posmatra se $s(k)$ kao određena funkcija od $r(k)$ i $e(k)$ i traži takvo $k=k_0$ da je vrednost $s(k_0)$ minimalna ili maksimalna. Tipične funkcije $s(k)$ su:

- apsolutna razlika: $s_1(k) = \sum_{i=0}^N |e(k+1) - r(i)|$, (5.18)

- kvadrat razlike: $s_2(k) = \sum_{i=0}^N [e(k+1) - r(i)]^2$, (5.19)

- korelacija: $s_3(k) = \sum_{i=0}^N e(k+1) * r(i)$. (5.20)

pri čemu je vreme označeno indeksom k kao $t = kT_s$ (T_s je vreme semplovanja). Indeks k_0 odgovara kašnjenju u kome je sličnost između referentnog r i aktuelnog eho signala e najveća, odnosno kada jednačine (5.18) i (5.19) imaju minimum, a jednačina (4.20) maksimum. Tada je merena daljina tačke na objektu

$$x = x_0 + \frac{cT_0}{2} = x_0 + \frac{ck_0T_s}{2}, \quad (5.19)$$

gde su x_0 poznata daljina referentnog objekta i $T_0=k_0T_s$ vreme za koje ultrazvuk pređe rastojanje od referentnog do merenog objekta.

LITERATURA

1. R.Ludvig, D.Roberti: „A nondestructive ultrasonic imaging system for detection of flaws in metal blocks“, *IEEE Trans. on Instrumentation and Meas.*, Vol. 38, No. 1 (113–118), 1989.
2. J.B.Hoyes, Q.Shan, R.J.Dewhurst: „A non-contact scanning system for laser ultrasonic defect imaging“, *Measurement in Science and Technology*, No. 2 (628–634), 1991.
3. F.Figueroa, E.Barbieri: „An ultrasonic ranging system for structural vibration measurement“, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 40, No. 4 (764–769), 1991.
4. R.Kuc, V.B.Viard: „A physically based navigation strategy for sonar-guided vehicles“, *The Int. Journal of Rob. Res.*, Vol.10, No.2 (75–87), 1991.
5. M.Parrila, J.J.Anaya, C.Fritsch: „Digital signal processing techniques for high accuracy ultrasonic range measurements“, *IEEE Trans. on Instrumentation and Meas.*, Vol. 40, No. 4 (759–763), 1991.
6. A.Pugh (ed.): „*Robot Sensors: Vol.2 – Tactile and non-vision*“ IPS (Publications) Ltd. Bedford and Springer-Verlag, Berlin, 1986.
7. J.Kbight, S.Pomery, H.Dixon, M.Wybrow: „Ultrasonic distance measuring and imaging systems for industrial robots“, *Robotics*, Vol. 3, No. 2 (181–188), 1987.
8. A.S.Fiorillo, B.Allota, P.Dario, R.Francesconi: „An ultrasonic range sensor array for a robotic fingertip“, *Sensors and Actuators*, Vol. 17., Nos. 1&2 (103–106), 1989.

6

SENZORI VIZIJE

6.1. VEŠTAČKA VIZIJA

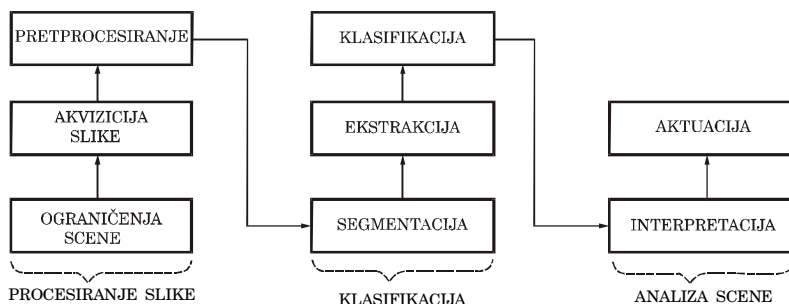
6.1.1. Osnovni pojmovi

Veštačka vizija je multidisciplinarno područje koje povezuje računarstvo, elektroniku i robotiku sa ciljem da se veštački imitira čovekova vizuelna percepcija. Imitacija triju komponenti čovekove vizuelne percepcije – oka, optičkog nerva i moždanih funkcija – u pojedinim aspektima je bolja, a u ponekim slabija od uzora. Kada su u pitanju brzina, kontinualni rad, objektivnost merenja i izdržljivost u nepogodnoj okolini, prednost je na strani veštačkih sistema vizije.

Emulacija suštinskih funkcija čovekovog vida, međutim, još uvek nije zadovoljavajuća. Čovek percipira i interpretira realni svet u tri dimenzije, dok svi kompjuterski displeji daju dvodimenzionalnu sliku kao rezultat projekcije 3D–predmeta na 2D–ravan. Ovaj proces može se opisati matematički. Obrnut proces nije lako izvodljiv i teško se opisuje matematički, a upravo je njegova primena od suštinskog značaja za automatske sisteme vizije jer treba da omogući robotu kretanje u 3D–okolini i prepoznavanje predmeta. Većina savremenih sistema vizije u robotici zasniva se na primeni kamera koje daju ravansku sliku, a dodatnim sredstvima dolazi se do dubine (reljefa) prostora. Uređaji koji daju prostornu sliku još uvek su komplikovani i skupi za širu upotrebu.

Koncept veštačke vizije strukturisan je hijerarhijski (slika 6.1). Na najnižem hijerarhijskom nivou je procesiranje slike IP (*Image Processing*), odnosno dobijanje slike i njene poboljšane verzije. Na srednjem nivou je klasifikacija likova PC (*Pattern Classification*), odnosno sposobnost prepoznavanja objekata na sceni.

Analiza scene SA (*Scene Analysis*) je najviši i najsloženiji nivo veštačke vizije jer se tu vrši interpretacija dobijenih dvodimenzionalnih slika u skladu sa trodimenzionalnim objektima na sceni.



Slika 6.1. Hijerarhijska organizacija veštačke vizije

6.1.2. Procesiranje slike

Prvi nivo u stvaranju veštačke vizije je procesiranje slike, odnosno dobijanje slike i njene poboljšane verzije. Bitne etape su: rešavanje problema sa ograničenjima scene, uzorkovanje scene i primarna obrada slike.

Ograničenja scene. Objekti moraju biti vidljivi u području optičkog spektra u kome sistem vizije radi. Zato je definisanje ograničenja posmatrane scene etapa od koje zavisi kvalitet uzorkovanja, a time i kvalitet konačne slike. Najvažnija ograničenja su: osvetljenost radnog prostora, raspored i vrsta proizvodne opreme, operativna međudelovanja, faktori sigurnosti, prisutnost prašine i eksplozivnih sastojaka, priroda i veličina radne okoline.

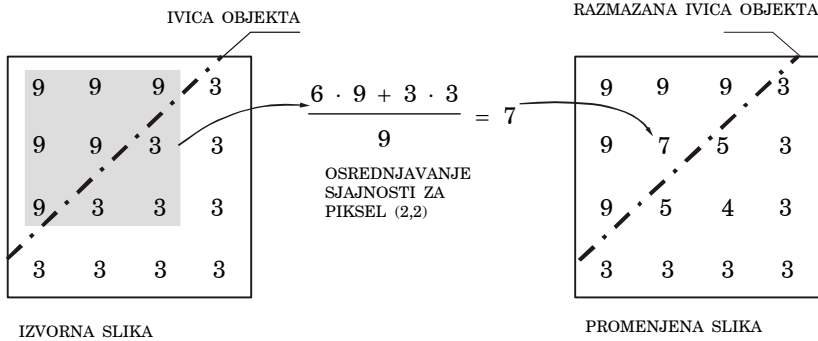
Akvizicija slike je uzorkovanje scene u okviru postojećih ograničenja. To je optoelektronski proces u kome se svetlosni signali $s(x, y, z, t)$ pretvaraju u električne signale. Senzori koji rade na ovom principu označavaju se kao senzori vizije ili senzori slike. Oni su poredani u matricu, pa je ukupni rezultat pretvaranja slika scene $f(x, y, t)$ određene rezolucije, obično do 512×512 piksela. To znači da slika nije prostorno kontinualna i da ne zavisi od koordinate z , odnosno od dubine prostora. Slika dobijena u jednom trenutku je statička, a sukcesivni niz takvih slika odgovara dinamičkim promenama u prostoru.

Svakom pikselu kao elementu slike pridružuje se određena sjajnost L (luminentnost = intenzitet svetlosti po jedinici površine, cd/m^2): binarna vrednost (1 bit), redukovana skala od 16 sivih tonova (4 bita) ili puna skala od 256 sivih tonova (8 bita). Obično je crno 0, a belo – zavisno od broja bita – 1, 15 ili 255. Crno-bela slika sa 256 tonova sivog omogućava da se reši širok spektar problema u industrijskoj primeni. Za specifične zahteve neophodna je slika u boji. Njeno dobijanje i obrada nešto su složeniji u odnosu na crno-belu sliku.

Pretprocesiranje se odnosi na poboljšanje i transformaciju originalne slike u formu pogodnu za dalju obradu. Obim pretprocesiranja ograničen je vremenom (40 ms za monitore sa 25 slika/s) i računarskim resursima. Operatori pretprocesiranja deluju prostorno – piksel po piksel, ili integralno na celu sliku. Tipične operacije su filtracija šumova, podešavanje sjajnosti slike i podešavanje kontrasta.

Filtracija šuma neophodna je da bi se popravio kvalitet slike. Zbog prisustva šuma pojedini detalji kao što su ivice objekata svetliji su ili tamniji više nego što bi trebalo da budu, pa ih je teže detektovati. Za eliminaciju šuma tradicionalno se primenjuje niskopropusni filter. U analizi slike ovaj način može biti i kontraproduktivan jer detalji često sadrže upravo visokofrekventne komponente kao koristan signal. Kada je šum periodički, primena niskopropusnih i pojasnih filtera daje dobre rezultate.

Softverske tehnike filtracije šuma su lokalno usrednjavanje, usrednjavanje po celoj slici i poređenje, tj. oduzimanje slike posle i slike pre neke operacije. Lokalnim usrednjavanjem sjajnost posmatranog piksela zamenjuje se sa vrednošću koja se računa kao srednja vrednost sjajnosti piksela unutar definisanog prozora – to je tzv. medijan filtera. Za ilustraciju ovog postupka može poslužiti slika predstavljena matricom od 4×4 piksela, pri čemu svaki piksel ima sjajnost od 0 do 9 (slika 6.2). Najmanji filter je prozor dimenzija 3×3 i na datoj slici može se postaviti u četiri različita položaja. U svakom položaju izračunata je srednja vrednost za piksele unutar prozora i sa njom zamenjena vrednost piksela u sredini prozora. Kao rezultat dobijena je slika sa manjim šumom, ali slično kao i kod upotrebe niskopropusnog filtera nastaje razmazivanje ivice. Što god je prozor manji, razmazivanje detalja i nivo otklonjenog šuma su manji.



Slika 6.2. Lokalno usrednjavanje

Najbolji rezultati postižu se modifikovanim lokalnim usrednjavanjem. Suština je da se prvo odredi lokacija šuma, odnosno oni pikseli čija se sjajnost izrazito razlikuje od okolnih, a onda se samo na te piksele primeni lokalno usrednjavanje.

Podešavanje sjajnosti slike provodi se kada je slika svetlija ili tamnija od željene. Ova transformacija jednostavno se realizuje dodavanjem ili oduzimanjem određene sjajnosti od svih piksela.

Podešavanje kontrasta primenjuje se zbog neadekvatnog osvetljenja scene ili neadekvatne ekspozicije. Kada slika ima slab kontrast, histogram raspodele piksela po sjajnosti (skala sivog) ima otklon prema svetlijim ili tamnijim regijama, pa su konture predmeta u tim regijama slabo izražene. Kontrastna slika treba da ima uniformniju raspodelu sjajnosti s da bi detalji bili vidljivi i u svetlim i u tamnim regijama. To se postiže ekvalizacijom histograma $p(s)$ pomoću nelinearne transformacije $T(s)$.

Kao primer može se uzeti slika 8×8 piksela, pri čemu pikseli imaju sjajnost od 0 do 9 (slika 6.3.a). Na ordinati histograma nanet je broj piksela p iste sjajnosti s (slika 6.3.b) Histogram se često prikazuje u normiranom obliku i tada je na ordinati relativna frekvencija piksela p' iste sjajnosti:

$$p' = \frac{p}{M \cdot N} = \frac{p}{8 \cdot 8}, \quad (6.1)$$

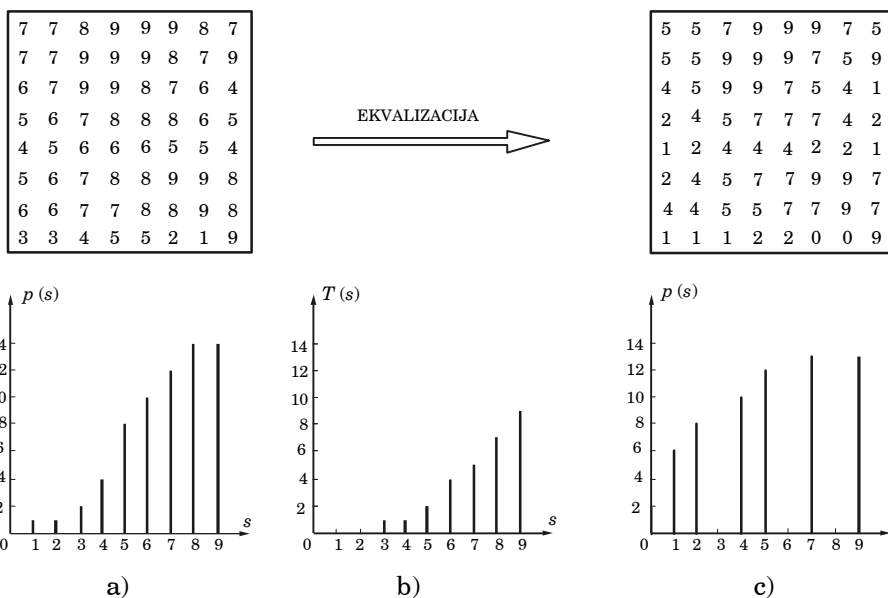
gde su M i N dimenzije slike. Ekvalizacija sjajnosti obično se svodi na transformaciju histograma $p(s)$ pomoću kumulativne funkcije:

$$T(s) = \frac{B}{M \cdot N} \sum_{i=0}^B p(i), \quad (6.2)$$

gde faktoru B odgovara maksimalna sjajnost (u konkretnom slučaju $B=9$). Na primer, pikseli sjajnosti $s=3$ transformišu se u piksele sjajnosti

$$\begin{aligned} T(3) &= \frac{9}{64} [p(0) + p(1) + p(2) + p(3)] = \\ &= \frac{9}{64} [0 + 1 + 1 + 2] = \frac{36}{64} \approx 1. \end{aligned} \quad (6.3)$$

Na isti način računaju se modifikacije ostalih piksela. Ove vrednosti čuvaju se u memoriji kao tabela ekvalizacije, kojoj odgovara dijagram transformacione funkcije $T(s)$ prikazan na slici 6.3.b. Nakon ekvalizacije dobija se nova slika sa drugačijom distribucijom sjajnosti (slika 6.3.c).



Slika 6.3. Podešavanje kontrasta: a) početna slika i njen histogram b) dijagram transformacione funkcije c) slika posle ekvalizacije i novi histogram

6.1.3. Klasifikacija likova

Drugi nivo u hijerarhijskoj koncepciji vizije, kako je predstavljeno na slici 6.1, jeste sposobnost prepoznavanja likova na

sceni. Na prethodnom nivou optoelektronskim postupkom dobijena je dvodimenzionalna slika scene i izvršene su određene korekcije radi poboljšanja kvaliteta slike. Klasifikacija je postupak izdvajanja određenih karakteristika likova na slici i njihovo prepoznavanje prema ranije definisanom kriterijumu. Postoji veliki broj algoritama za tu namenu. Za rad u realnom vremenu najpogodniji su algoritmi na bazi detekcije linija i kontura ili na bazi detekcije regija.

Detekcija ivica je prvi korak u klasifikaciji i sastoji se u segmentaciji, tj. deljenju slike na elementarne ivice i njihovom spajanju u linije i konture objekta. Broj piksela koji pripada liniji mali je u odnosu na ukupan broj piksela na slici. Međutim, njihovo određivanje je veoma važno jer su informacije sadržane u linijama ključne za prepoznavanje predmeta.

Kada slika ima dobar kontrast i kada je očišćena od šumova, normalno na pravac prostiranja linije javljaju se nagle promene u skali sivog. Promene u gradijentu sivog računaju se pomoću diferencijalnih operatora, koji u suštini predstavljaju visokopropusne filtere.

Jednodimenzionalni diferencijalni operator prvog reda je najprostiji. Pomoću njega računa se razlika u sjajnosti susednih signala (piksela) duž jedne koordinate, npr. duž vrste x . Maksimalna promena sjajnosti odgovara pikselu koji pripada ivici objekta. Operator se obično zapisuje u obliku diferencne jednačine:

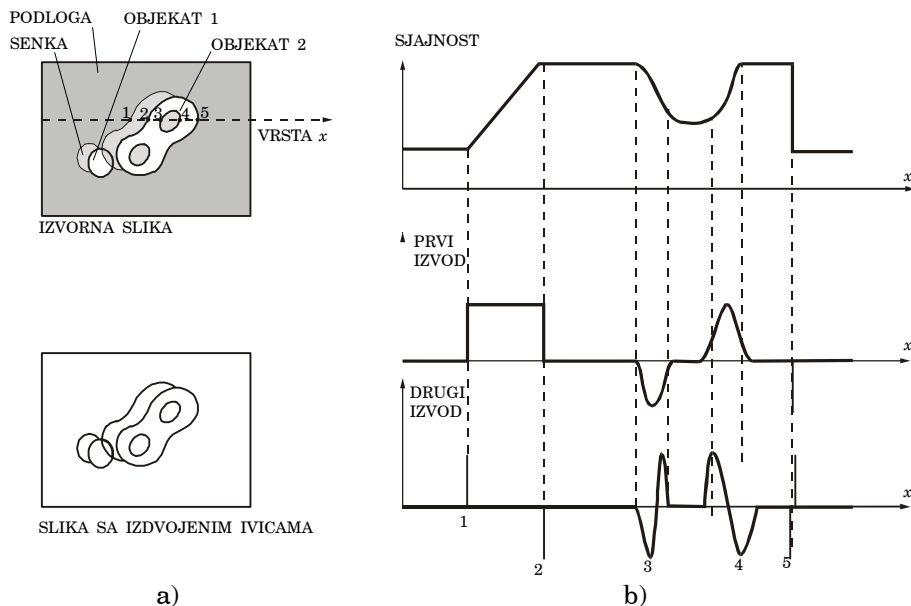
$$y_1 = x(n) - x(n - 1). \quad (6.4)$$

Primena ovog operatora ilustrovana je za bele objekte sa senkom na tamnoj podlozi (slika 6.4). Prelasku sa sivog na belo odgovara porast sjajnosti, a prelasku sa belog na sivo opadanje. Pri vertikalnoj promeni sjajnosti prvi izvod (6.4) trebalo bi da bude beskonačan ($dy/dx \rightarrow \infty$ za $dx \rightarrow 0$). To se neće dogoditi jer je dx ekvivalentno rezoluciji slike i ima konačnu vrednost, pa je i dy/dx uvek konačno.

Jednodimenzionalni diferencijator drugog reda realizuje se diferenciranjem prvog izvoda (6.4):

$$\begin{aligned} y_2 &= y_1(n) - y_1(n - 1) = \\ &= x(n) - 2x(n - 1) + x(n - 2). \end{aligned} \quad (6.5)$$

Na mestima gde drugi izvod prolazi kroz nulu prvi izvod ima ekstremnu vrednost, odnosno to mesto pripada ivici (tačke 1–5 na slici 6.4).



Slika 6.4. Detekcija ivice diferencijalnim operatorom prvog i drugog reda: a) slika, b) sjajnost duž vrste x , prvi i drugi izvod sjajnosti

Važno je istaći da se komponente drugog izvoda mogu dobiti konvolucijom slike $x(n)$ sa filterom $h(n)$:

$$\begin{aligned}
 y(n) &= \sum_{n_1=0}^2 h(n_1) \cdot x(n - n_1) = \\
 &= h(0)x(n) + h(1)x(n - 1) + h(2)x(n - 2), \quad (6.6)
 \end{aligned}$$

gde su koeficijenti impulsnog odziva filtera $h(0)=-1$, $h(1)=2$ i $h(2)=-1$.

Robertsov operator. Za detekciju linija u ravni xy , odnosno slike $f(x,y)$, potrebni su operatori diferenciranja u pravcu x i pravcu y . Ovi operatori daju informaciju o lokaciji, veličini i orijentaciji elementarne ivice. Lokacija ivice data je koordinatama tačke (x,y) , a orijentacija se računa kao gradijent G , tj. kao dvokomponentni vektor usmeren u pravcu maksimalne brzine promene slike $f(x,y)$:

$$\mathbf{G}[f(x, y)] = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}. \quad (6.7)$$

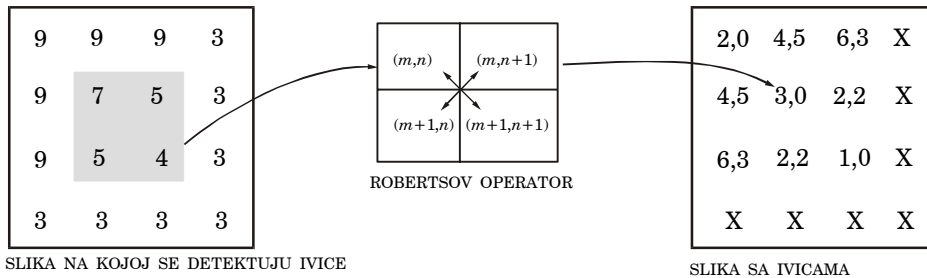
Intenzitet vektora \mathbf{G} računa se jednostavno:

$$|\mathbf{G}| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}. \quad (6.8)$$

Slika nije kontinualna već je predstavljena u diskretnim lokacijama (pikselima) sa definisanom skalom sivog. Digitalna verzija za izračunavanje gradijenta ima različite oblike. Robertsov operator aproksimira prvu derivaciju za piksel (m, n) na sledeći način:

$$R(m, n) = \sqrt{[i(m+1, n+1) - i(m, n)]^2 + [i(m, n+1) - i(m+1, n)]^2}, \quad (6.9)$$

gde je $i(m, n)$ sjajnost piksela (m, n) . Vrednost operatora računa se iz dijagonalnih piksela omeđenih prozorom 2×2 , prema šemi na slici 6.5. Na primer, kada se Robertsov operator primeni na matricu dobijenu filtracijom šuma metodom lokalnog usrednjavanja (slika 6.2), kao rezultat dobija se nova matrica. Njeni elementi označeni sa \times predstavljaju mesta gde prozor 2×2 izlazi izvan slike.



Slika 6.5. Primena Robertsovog operatora

Sobelov operator je dvodimenzionalni operator pomoću kojeg se vrednosti gradijenta računaju unutar prozora 3×3 . Komponente gradijenta definisane su na sledeći način:

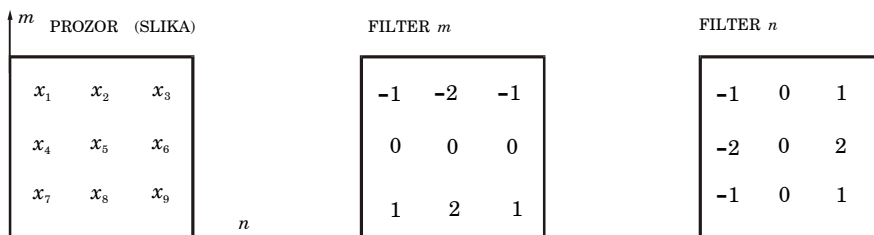
- u pravcu ose m :

$$G_m = (x_7 + 2x_8 + x_9) - (x_1 + 2x_2 + x_3); \quad (6.10)$$

- u pravcu n :

$$G_n = (x_3 + 2x_6 + x_9) - (x_1 + 2x_4 + x_7). \quad (6.11)$$

Komponente gradijenta G_m i G_n mogu se izračunati konvolucijom slike sa impulsnim odzivom filtera čiji su koeficijenti dati na slici 6.6.



Slika 6.6. Sobelov operator

Prostorna filtracija je opšti slučaj dvodimenzionalnih operatora pomoću kojih se cela slika predstavlja kao niz dvodimenzionalnih frekventnih komponenti sa promenljivom amplitudom i fazom. Ovaj način poznat je kao Furijeova dekompozicija. Prostorni filter pojačava (ističe) dvodimenzionalni frekventni sadržaj slike, na osnovu čega se mogu izdvojiti detalji slike sa visokom frekvencijom kao što su ivice.

Prostorna filtracija provodi se primenom prostorne konvolucije. Konvolucija je složena matematička operacija nad dvema funkcijama istih promenljivih, npr. $f(a,b)$ i $h(a,b)$, koja se zapisuje u obliku:

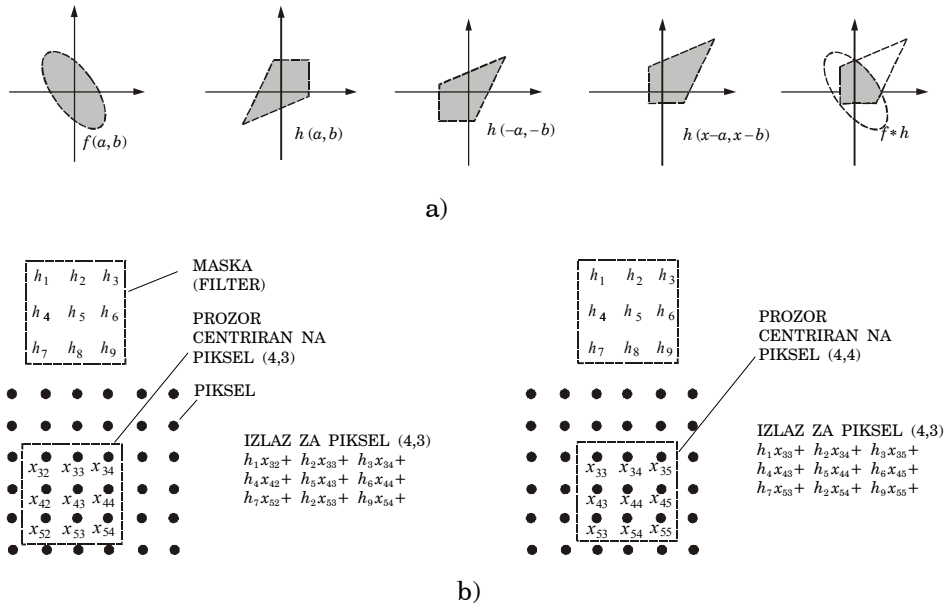
$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(a, b) \cdot h(x - a, y - b) da db \quad (6.12)$$

Kada su promenljive geometrijske koordinate, tada se ima prostorna konvolucija. Mada je u pitanju složen operator, njegov smisao i primena u tehnici filtracije mogu se lako objasniti grafički (slika 6.7.a). Kao što se vidi, konvolucija predstavlja presek površina $f(a,b)$ i $h(x-a,y-b)$, odnosno proizvod funkcije $f(a,b)$ i funkcije $h(a,b)$ koja je rotirana za 180° i pomerena za iznos x i y duž ortogonalnih osa. Podešavanjem x i y izdvaja se željeni deo $f(a,b)$, tj. filtriraju se određeni detalji slike. Filtracija pomoću prostorne konvolucije mnogo lakše i brže se realizuje u frekventnom nego u prostornom domenu. Naime, analogno funkcijama koje zavise od

vremena t , može se i za funkcije koje zavise od geometrijskih promenljivih definisati Furijeova transformacija. Pomoću Furijeovog operatora \mathcal{F} prostorna konvolucija (6.13) prevodi se u domen prostorne frekvencije:

$$\begin{aligned}\mathcal{F}\{f(x,y)*h(x,y)\} &= \mathcal{F}\{f(x,y)\}*\mathcal{F}\{h(x,y)\} = \\ &= F(u,v)\cdot H(u,v),\end{aligned}\quad (6.13)$$

gde su $F(u,v)$ i $H(u,v)$ Furijeove dvodimenzionalne transformacije funkcija prostornih promenljivih $f(x,y)$ i $h(x,y)$.



Slika 6.7. Prostorna konvolucija: a) značenje, b) primena konvolucione matrice u dva sukcesivna položaja: za piksel (4,3) i piksel (4,4)

Računanje prostorne konvolucije (6.13) je složen proces za koji treba dosta vremena. Kako prostornoj konvoluciji odgovara množenje u frekventnom domenu, računanje pomoću (6.14) je znatno brže. Za efikasniji proračun koriste se programi DFT (*Digital Fourier Transform*) ili FFT (*Fast Fourier Transform*). Filter $H(u,v)$ za odstranjivanje neželjenih efekata na slici ili za ekstrakciju određenih detalja realizuje se u digitalnoj formi, najčešće kao konvoluciona matrica 3×3 . Svakom pikselu pridružuje se određeni intenzitet sive boje koji je relativan u odnosu na susedne piksele.

Pomoću prozora (prostornog filtera, maske) formata 3×3 određena je okolina odabranog piksela. Prozor se pomera na slici i svaki put za piksel u sredini prozora računa se njegova transformisana vrednost, pri čemu je udeo piksela unutar prozora definisan koeficijentima konvolucije h_i i intenzitetom sivog u položajima f_{ij} , $i, j=1, 2, 3$ (slika 6.7.b). Konvolucione matrice većeg formata od 3×3 u robotici se retko primenjuju jer zahtevaju znatno veće računarske resurse.

Detekcija ivica i komparacija. Zajedno sa korisnim signalom filter će propustiti šumove i fluktuacije na slici zaostale nakon prethodne obrade, što se odražava na tačnost detekcije ivica. Zato se iza diferencijalnih operatora uvek stavlja komparator. Prag detekcije komparatora T (*Threshold*) primenjuje se lokalno na delu slike ili integralno na celoj slici. Vrednost praga određena je prema nekom kriterijumu. Na primer, prag detekcije može se odrediti pojedinačno za svaki piksel na osnovu njegove sjajnosti, na osnovu distribucije sjajnosti piksela koji okružuju razmatrani piksel ili na osnovu transformacije histograma intenziteta tako da težinski udeo svakog piksela zavisi od njegovih lokalnih svojstava.

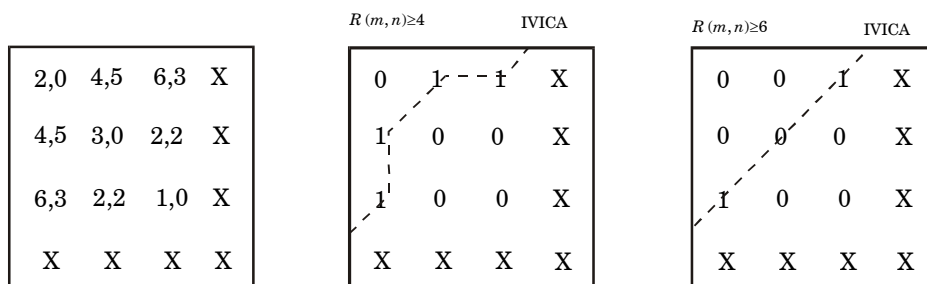
Rezultat komparacije predstavlja se u binarnom obliku ili sa skalom sivog. U prvom slučaju n -tom pikselu sjajnosti $L(n)$ pridružuje se binarna vrednost $L_o(n)$:

$$L_o = \begin{cases} 1 & \text{za } L(n) \geq T \\ 0 & \text{za } L(n) < T, \end{cases} \quad (6.14)$$

a u drugom slučaju je

$$L_o = \begin{cases} L(n) & \text{za } L(n) \geq T \\ 0 & \text{za } L(n) < T. \end{cases} \quad (6.15)$$

Pragom detekcije T komparatora definišu se elementi slike koji su od interesa, na primer elementi koji će biti tretirani kao ivice. U matrici dobijenoj primenom Robertsovog operatora $R(m, n)$ svi elemenati osim onih označenih sa \times predstavljaju ivicu (slika 6.2). Zato se linija objekta tu ne razaznaje. Ako se, međutim, kao ivice definišu samo elementi čija je vrednost veća od praga $R(m, n) \geq T$, dobija se binarna matrica sa jedinicama kao ivicama. Na slici 6.8 prikazani su rezultati komparacije za $R(m, n) \geq 4$ i $R(m, n) \geq 6$.



Slika 6.8. Komparacija

Spajanje ivica u linije i konture objekta realizuje se posebnim postupcima. Široku primenu ima trejsing (*tracing*), postupak kojim se binarna slika dobijena komparacijom skenira prozorom određenih dimenzija – najmanje 3×3 . Kada se detektuje jedinica ona se spaja sa prethodnom jedinicom u liniju, a kada se detektuje nula to se registruje kao kraj tekuće linije.

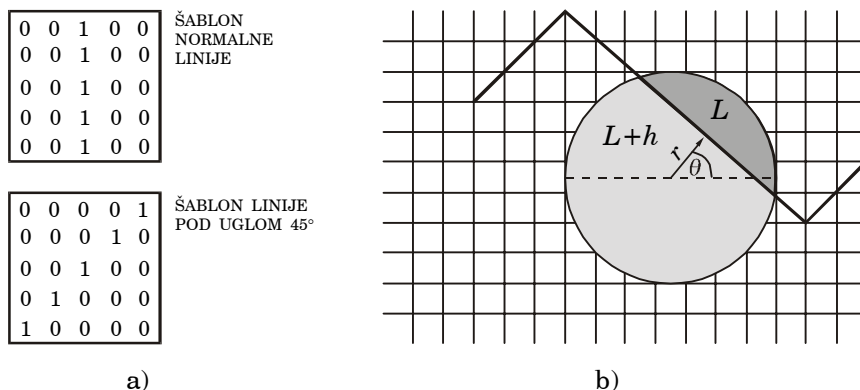
Složenije spajanje realizuje se poređenjem ivica u binarnoj slici sa šablonima linija (*template matching*). Šabloni linija su u prozorima dimenzija 5×5 ili 7×7 . Prozor sa šablonom pomera se po binarnoj slici i poredi sa tim delom slike. Na mestima gde se slika i šablon podudaraju stavlja se jedinica, a na mestima gde se razlikuju stavlja se nula. Za svaku lokaciju računa se ukupni broj poklapanja sa šablonom. Ovaj broj obično se iskazuje u procentima i služi kao mera slaganja slike i šablona. Tipični šabloni su vertikalna, horizontalna i dijagonalna linija (slika 6.9.a). Umesto binarnih šablona za izdvajanje mekih ivica potrebni su šabloni sa skalom sivog. Mera M kojom se izražava slaganje slike P i šablona T dimenzija $i \times j$ u tački (m, n) računa se na sledeći način:

$$M(m, n) = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j [P(m+1, n+j) - T(i, j)]^2}{\left[\sum_i \sum_j P(m+1, n+j) \right] \cdot \left[\sum_i \sum_j T(m+1, n+j) \right]}}, \quad (6.16)$$

gde je nazivnik pod korenom uvršten radi normalizacije rezultata.

Složeniji algoritam realizuje se pomoću *Hueckelove maske*. Maska ima oblik kruga i sa njom se skenira slika. Kada krug prelazi preko linije, ona ga seče na dva dela različite sjajnosti: L i $L+h$. Lokacija sekante određena je vektorom r . Sekanta se računa u

svakoj tački variranjem sjajnosti L , sjajnosti $L+h$, modula $|r|$ i ugla θ , sa ciljem da se dobije optimalna linija sa minimalnim odstupanjem u odnosu na okolinu (slika 6.9.b).



Slika 6.9. Spajanje u liniju: a) šabloni sa linijama, b) Hueckelova maska

Izdvajanje regija je metoda klasifikacije objekata koja se primenjuje samostalno ili kao dopuna metodi izdvajanja ivica. Zasnovana je na segmentaciji slike na oblasti sličnih karakteristika. Najčešći kriterijum sličnosti je sjajnost piksela. Histogram distribucije piksela sastoji se od vrhova i udolina. Iz teorije verovatnoće je poznato da pikseli oko vrha imaju približno jednaku sjajnost, pa se na osnovu toga pretpostavlja da pripadaju istoj regiji. Prag detekcije postavljen na udolinama između vrhova služi kao mera razdvajanja. Na primer, na binarnoj slici mogu se izdvojiti samo dve regije: regija objekta i regija pozadine. Na crno-beloj panoramskoj slici mogu se izdvojiti regije neba, oblaka, tla, zgrada i drveća. Tako se dolazi do redukovane informacije o slici, na osnovu koje je obrada jednostavnija.

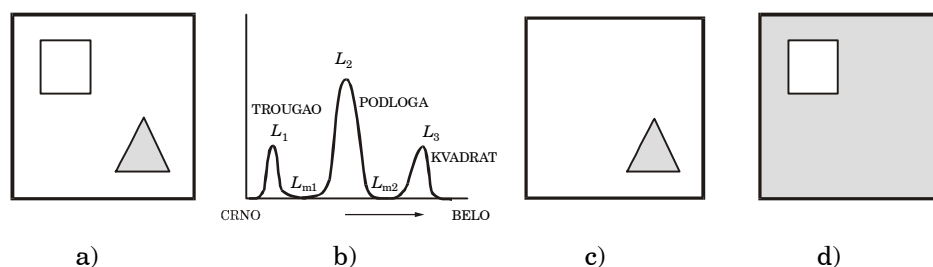
Algoritam izdvajanja regija ilustrovan je za kvadrat i trougao na beloj podlozi (slika 6.10.a). Odgovarajući histogram sjajnosti ima tri vrha L_1 (kvadrat), L_2 (podloga) i L_3 (trougao), (slika 6.10.b). Kada se prag detekcije postavi na minimumu L_{m1} između L_1 i L_2 , kao rezultat dobija se binarna slika, pri čemu je (slika 6.10.c):

- $L < L_{m1}$ sivo (trougao);
- $L > L_{m1}$ belo (podloga).

Kada se prag detekcije postavi na vrednost udoline L_{m2} između vrhova L_2 i L_3 , opet se dobija slika sa dve regije (slika 6.10.d):

- $L \leq L_{m2}$ sivo (podloga);
- $L > L_{m1}$ belo (kvadrat).

Heurističkim i relaksacionim postupcima povećava se tačnost izdvajanja ivica i regija. Heuristički algoritmi zasnivaju se na rešavanju problema pomoću sukcesivnih proba i grešaka, a relaksacioni algoritmi baziraju se na pretpostavci da svaki piksel pripada definisanoj klasi sa određenom verovatnoćom, a zatim se iteracionim računanjem ta verovatnoća povećava.



Slika 6.10. Izdvajanje regija: a) početna slika, b) histogram, c) binarno razdvajanje na $L=L_{m1}$, d) binarno razdvajanje na $L=L_{m2}$

Ekstrakcija i klasifikacija se odnose na identifikaciju istovrsnih karakteristika različitih objekata radi njihovog poređenja i konačnog prepoznavanja. Tipične karakteristike su kvadrat, pravougaonik, elipsa, krug, duž, perimetar, centar mase, minimalni pravouganik oko objekta, ugao orijentacije i dr. Time se smanjuje potreba za velikim memorijskim prostorom u kasnijim etapama obrade i pojednostavljuje klasifikacija, tj. prepoznavanje likova.

Koje će se karakteristike upotrebiti kao kriterijum klasifikacije zavisi od konkretnih zahteva i raspoloživih resursa. Sve karakteristike mogu se grupisati u direktne mere, izvedene mere i mere na bazi momenta.

Direktne mere su dimenzije kontura: dužina, širina, prečnik. Lako se računaju, omogućavaju dobru klasifikaciju pravilnih geometrijskih likova, a za složenije oblike služe samo kao pomoćno sredstvo.

Izvedene mere zasnovane su na jednostavnom računu. Tipične izvedene mere su:

- Area, u diskretnoj verziji ukupan broj piksela regije, a u kontinualnoj verziji površina regije

$$A = \iint k dx dy, \quad (6.17)$$

gde je k površina jednog piksela.

- Ukupna optička gustina IOD (Integrated Optical Density), u diskretnoj verziji suma sjajnosti za sve piksele regije, a u kontinualnoj verziji integral

$$\text{IOD} = \iint f(x, y) dx dy. \quad (6.18)$$

- Perimetar, broj piksela po konturi regije.
- Anvelopa, ovojnica regije. Predstavlja se pomoću dimenzija najmanjeg pravilnog geometrijskog lika koji se može opisati oko regije. Najčešće je to minimalni pravougaonik $\text{MER}=a \times b$ (*Minimal Enclosing Rectangle*).
- Faktori oblika, koji se definišu kao odnosi izvedenih mera:
 - faktor kružnog oblika = perimetar²/area, (6.19)
 - faktor pravouglog oblika = area/MER. (6.20)

Mere na bazi momenta su najsloženije za računanje. Ove mere daju podatke o poziciji i orijentaciji regije:

- Centroid (težište), najčešća mera za poziciju regije:

$$\bar{x} = \frac{\iint x \cdot f(x, y) dx dy}{\iint f(x, y) dx dy}, \quad \bar{y} = \frac{\iint y \cdot f(x, y) dx dy}{\iint f(x, y) dx dy}. \quad (6.21)$$

- Generalisani moment. Brojnik u sistemu jednačina (6.21) je specijalan slučaj generalisanog momenta

$$M_{p,q} = \iint x^p \cdot y^q \cdot f(x, y) dx dy, \quad (6.22)$$

gde od vrednosti eksponenata p i q zavisi koji će se moment, odnosno koja mera računati. Na primer, za $p=1$ i $q=0$ dobija se

$$\begin{aligned} M_{1,0} &= \iint x \cdot f(x, y) dx dy = \iint x f(x, y) dx dy \cdot \frac{\iint f(x, y) dx dy}{\iint f(x, y) dx dy} = \\ &= \bar{x} \cdot \text{IOD}. \end{aligned} \quad (6.23)$$

- Orijehtacija, mera položaja regije, računa se iz orijentacije glavne ose centralnog momenta. Glavna osa je najduža osa

posmatrane regije, a određuje se iz uslova da prolazi kroz centroid i uslova da momenti drugog reda oko te ose imaju minimalne vrednosti.

Ekstrakcija karakteristika oblika predmeta najprostija je za binarne slike. Standardni način je zapisivanje redosleda belih ($W=1$) i crnih piksela ($B=0$) po vrstama slike, što je zapravo logički model slike. Na primer, za sledeću sliku dimenzija 16×16 odgovarajući zapis je:

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	→	16B
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	→	16B
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	→	16B
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	→	8B 2W 6B
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	→	7B 6W 3B
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	→	5B 8W 3B
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	→	4B 9W 3B
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	→	5B 9W 2B
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	→	5B 9W 2B
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	→	5B 9W 2B
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	→	5B 8W 3B
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	→	6B 6W 4B
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	→	10B 1W 5B
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	→	16B
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	→	16B
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	→	16B

(6.24)

Slika je sada zapisana u kodiranom obliku pogodnom za matematičku obradu radi analize oblika. Zavisno od dimenzija i oblika piksela, te složenosti algoritma, mogu se izračunati maksimum, minimum, dužina, širina, težište, ugao orijentacije, ekscentričnost, upisani i opisani pravougaonik, minimalni i maksimalni poluprečnik i dr.

6.1.4. Analiza scene

Završni nivo veštačke vizije je analiza scene, koja se odvija kroz interpretaciju i aktuaciju. Interpretacija slike vezana je za razvoj veštačke inteligencije i ekspertnih sistema. Osnovni problem je transformacija relativno prostih karakteristika 2D-slike u

apstraktni opis 3D-objekata prisutnih na sceni. Inteligentni sistemi vizije imaju baze podataka i sposobnost a priori znanja o datoj klasi objekata, čime se poboljšavaju rezultati analizirane scene.

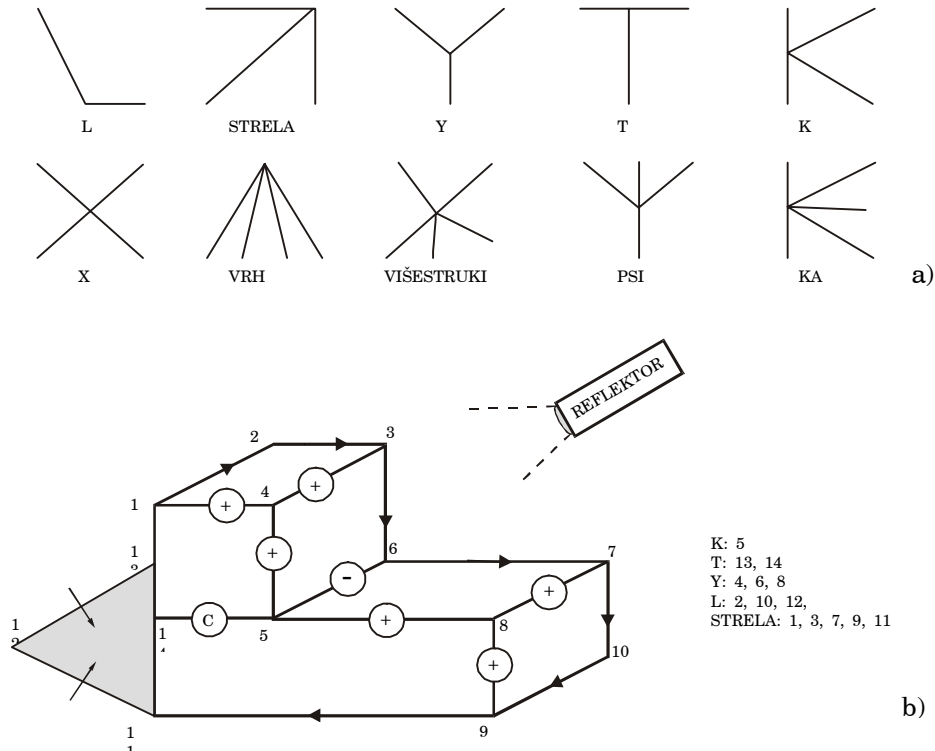
U toku aktuacije rezultat interpretacije usklađuje se kroz interakciju robota i scene radi preduzimanja naredne akcije sistema vizije. Posebno je dobro razrađena metoda geometrije ivica, tj. ekstrakcija za linijske slike objekata. Problemi koji se rešavaju u ovom domenu su sledeći:

- pretraživanje linija i kontura;
- grupisanje oblasti radi definisanja konture lika pri formiranju pojedinih geometrijskih figura (objekata);
- identifikacija objekta;
- analiza međusobnih odnosa objekata na sceni (dodir, prekrivanje).

Interpretacija pomoću geometrije ivica. Polazište u rešavanju navedenih problema je klasifikacija ivica na:

- vanjske (leže na granicama najveće promene skale sivog i obeležavaju se strelicom \rightarrow);
- unutrašnje konkavne (leže na dodiru dveju površina između kojih je ugao veći od 180° i obeležavaju se znakom +);
- unutrašnje konveksne (leže na granici dveju površina između kojih je ugao manji od 180° i obeležavaju se znakom -);
- konektivene (leže na spoju dva tela i obeležavaju se slovom C);
- granične (leže na prelazu između pozadine scene i senke i obeležavaju se znakom ∇).

Sa ovim linijama mogu se predstaviti samo prizmatična tela. Posebna pravila razrađena su za temena, tj. za spojeve više linija (slika 6.11.a). Primer opisivanja scene na bazi geometrije ivica rezimiran je za prizmatično telo sa senkom (slika 6.11.b).



Slika 6.11. Prepoznavanje na bazi geometrije ivica: a) tipovi temena, b) primer označavanja ivica i temena na prizmatičnom telu

6.2. PRIMENA SISTEMA VIZIJE U ROBOTICI

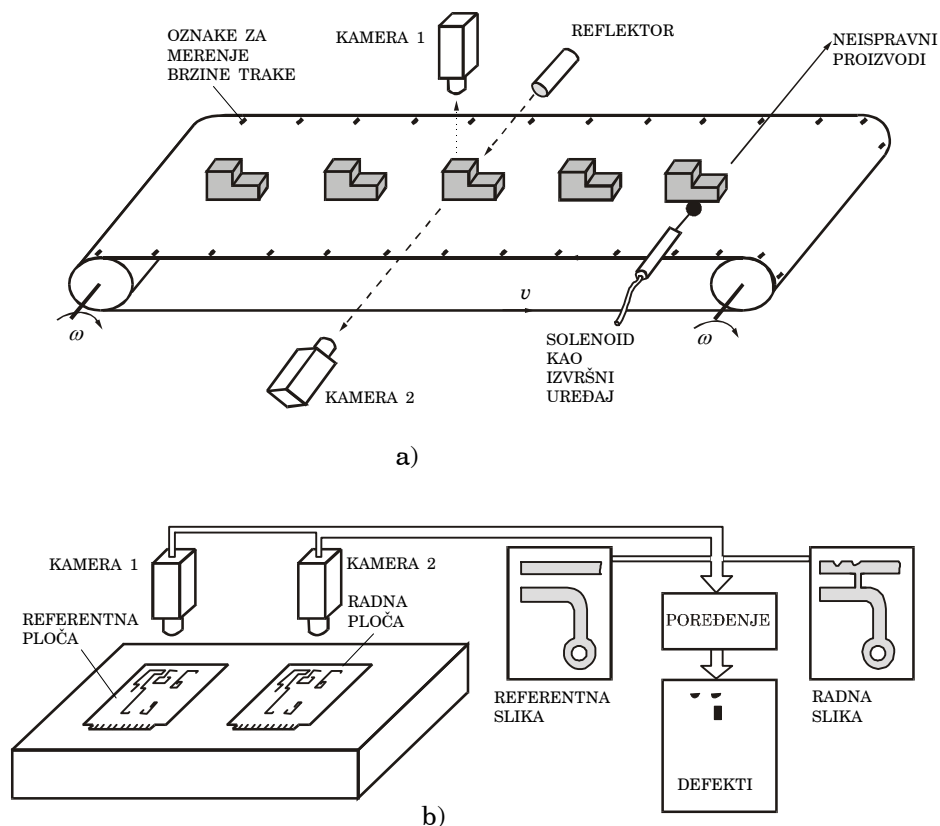
Primena veštačke vizije najpre je započela u prepoznavanju pisanih znakova, u prepoznavanju biološkog materijala u mikroskopiji i u prepoznavanju različitih objekata vojne namene. Razvoju veštačke vizije posebno su doprinele veštačka inteligencija i prepoznavanje oblika kao naučne discipline, računari kao sredstvo za obimne i brze proračune, te digitalna televizija i robotika kao nove tehničke oblasti.

Dva osnovna područja primene veštačkih sistema vizije su vizuelna kontrola kvaliteta i vođenje robota.

6.2.1. Kontrola kvaliteta

Vizuelna kontrola (inspekcija) je poređenje neke slike ili njenog dela sa prethodno definisanim standardom. Obično se radi o kontroli dimenzija, karakteristikama oblika ili površine radnog predmeta nakon određene operacije. U industriji se razlikuju tri specifične oblasti primene: kontrola dimenzija, kontrola površine proizvoda i kontrola štampanih ploča u mikroelektronici.

Kontrola dimenzija (oblika) proizvoda primenjuje se u automobilskoj, tekstilnoj, prehrambenoj i metalско-prerađivačkoj industriji. Proizvodi koji odstupaju od dozvoljenih toleransi skidaju se sa pokretne trake, pri čemu su posebno složene situacije kada se proizvodi prekrivaju ili im nedostaje jedan deo. U takvim situacijama korisno je imati dve kamere pod uglom od 90° ili 180° (slika 6.12.a). Dopunske informacije o teksturi površine daju taktilni senzori.



Slika 6.12. Kontrola: a) dimenzija proizvoda na traci, b) štampanih ploča

Kontrola površine proizvoda od metala, drveta i tekstila primenjuje se u određenim fazama obrade kao što su poliranje, struganje, bojenje i zavarivanje. Kada manipulator sa odgovarajućim alatom otklanja defekte na površini, uporedo sa kontrolom površine često je potrebna i kontrola dimenzija.

Kontrola štampanih ploča pri ugradnji elektronskih elementa izdvaja se od drugih tipova kontrole zbog velikog broja različitih elemenata. Cilj je da se otkriju greške u proizvodnji ploče (prekid provodne linije, nedovoljan razmak između linija, nedovoljna širina linije, kratki spojevi, polomljeni kontakti) i greške pri asembliranju elemenata (nepravilno insertovanje, defekti pri bušenju, defekti na spojevima, zamena elemenata), (slika 6.12.b).

Najprostija struktura sistema za vizuelnu kontrolu štampanih ploča sastoji se od dve kamere koje snimaju referentnu i radnu ploču. Upoređivanjem dveju slika dobija se informacija o broju i vrsti i defekata (slika 6.12.b). Na određenim etapama proverava se i funkcionalnost ploče.

6.2.2. Vođenje robota

Vizuelno upravljanje kretanjem robota sastoji se od planiranja trajektorije, izbegavanja kolizije sa predmetima u radnoj okolini, adaptivnog upravljanja pozicije i usmeravanja robota u 3D-prostoru na tačno određenu poziciju. Većina industrijskih robota radi u dobro strukturisanoj (poznatoj) okolini, pa je određivanje pozicije pri kontroli relativno jednostavno pomoću tehnika 2D-vizije.

Mobilni roboti kreću se u slabo strukturisanoj okolini, pa je za veću pouzdanost i ponovljivost radnih operacija neophodna primena 3D-vizije. Primena veštačke vizije u vođenju robota karakteristična je za sledeće oblasti: automatsko asembliranje u proizvodnji, asembliranje elektronskih elemenata i uzimanje određenog elemenata iz gomile.

Automatsko asembliranje i proizvodnja. Obično sistem vizije daje binarnu sliku na osnovu koje se brzo prepoznaju elementi i određuje njihova lokacija i orijentacija. Slika sa skraćenom ili punom skalom sivih nijansi ima više informacija od binarne, ali je

njena obrada složenija. Na primer, najviši vrhovi histograma distribucije skale sivog odgovaraju pozadini jer je to najveća regija, a najniži objektu. Poseban slučaj vizije dobija se kada su fotosenzori ugrađeni neposredno na manipulatoru. Tada je rezolucija znatno veća, a prepoznavanje objekta složenije zbog promenljive tačke posmatranja.

Asembliranje elektronskih elemenata je poseban slučaj automatskog asembliranja jer se zahteva visoka tačnost pozicioniranja – do 0,1 mm. Uz to je potrebna visoka pouzdanost asembliranja elemenata, jer se potpuno funkcionalno testiranje kartice može obaviti tek kada je njeno opremanje u celosti završeno.

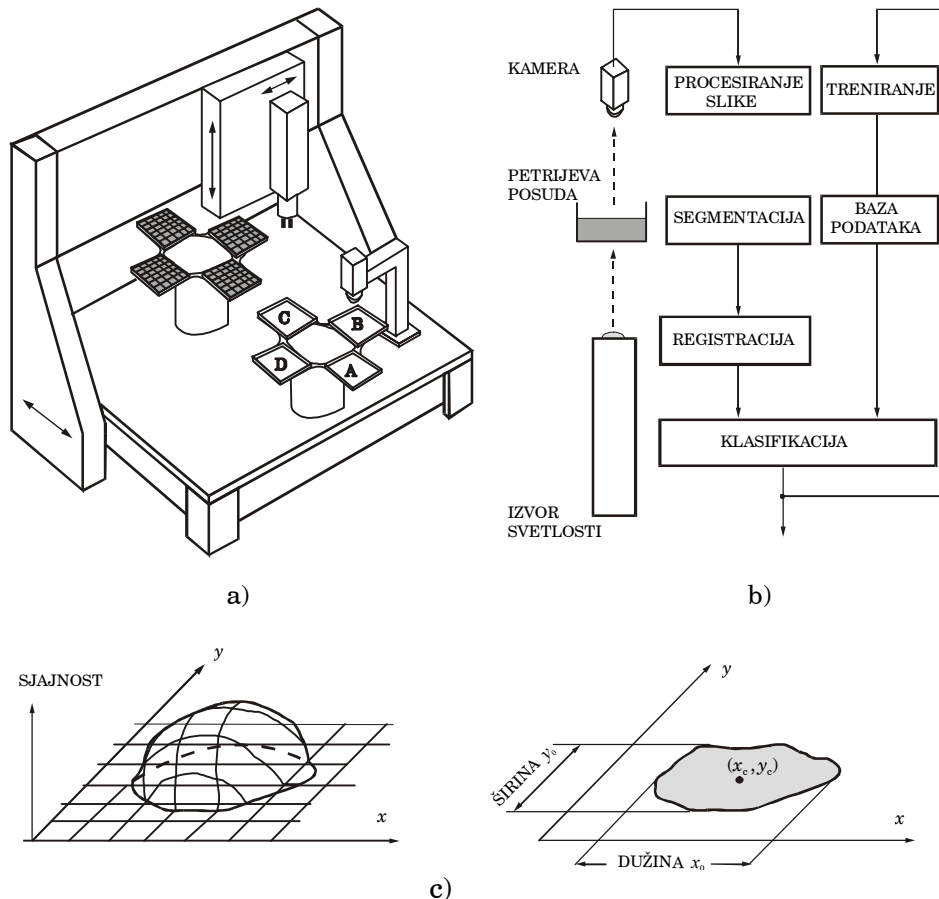
Uzimanje elemenata iz kutije ili sa neuređene gomile. Ova oblast veštačke vizije nije jednostavna jer se elementi dodiruju i preklapaju, tako da postoje teškoće u pojedinačnoj identifikaciji elementa. Obično se zahteva da hvataljka robota prvo mora da se pozicionira iznad elementa koji je na vrhu gomile i da njega prenese na određište. U vezi sa ovim problemima razvijeni su različiti algoritmi za prepoznavanje i lokaciju objekata na osnovu analize ivica ili regija na slici.

6.2.3. Prepoznavanje mikroorganizama

Uzgajanje mikroorganizama u biohemijskim laboratorijama je dugotrajan i zamoran posao. Visok stepen automatizacije selekcije postiže se pomoću robota sa odgovarajućim sistemom optičke vizije. Kulture mikroorganizama postavljaju se na hranljivu podlogu od morskih algi u Petrijeve posude, tj. u staklene posude prečnika 100 mm. Nakon određenog vremena vrši se selekcija sadržaja i rasađivanje kulture. U automatizovanoj laboratoriji zadatak robota je da pomoću sistema optičke vizije snimi površinu date Petrijeve posude, da na osnovu karakteristika te površine izdvoji područja sa mikroorganizmima koji su od interesa i da ih distribuira na određišta za dalju obradu.

Na slici 3.13.a prikazan je robot za automatsku selekciju i rasađivanje bakterija. Pomoćni robot postavlja Petrijeve posude na rotirajuće postolje. Postolje zatim rotira za 90° i posuda dolazi u

poziciju B ispod kamere sa 512×512 piksela. Svakom pikselu pridružuje se 8 bita, odnosno 256 nijansi sive boje. Svakoj nijansi sive boje odgovara određena sjajnost piksela, pri čemu je 0 crno, a 255 belo. Ovako visoka rezolucija sivog potrebna je da bi se sa što većom pouzdanošću uočile bakterije u odnosu na hranljivu podlogu, mehuriće vazduha, kondenzat ili fuge po staklu. Ispod posude je izvor svetlosti, tako da se sa gornje strane iz pravca kamere vide: bele oblasti (0,5–1 mm) koje propuštaju svetlo i koje sadrže novorazvijene bakterije, plave oblasti koje sadrže bakterije koje su se razvile nešto ranije i zato apsorbirale indigo-pigment iz podloge i oblasti podloge koje propuštaju svetlost sa intenzitetom zavisnim od debljine podloge. Cilj je da se izdvoje bele oblasti.



Slika 6.13. Automatska selekcija mikroorganizama: a) robotski sistem, b) sistem vizije, c) ekstrakcija parametara belih oblasti

Način rada. Prva etapa je uzorkovanje i dobijanje slike od $512 \times 512 \times 8$ bita (slika 3.13.b). U drugoj etapi provodi se segmentacija slike tako što se skeniraju polja od 64×64 piksela i za njih prave dijagrami distribucije sivog. Za svaki dijagram računaju se standardno odstupanje, srednja vrednost i odbacuju svi pikseli čiji intenzitet ima verovatnoću pojave manju od 1%.

Pri prelasku na naredno polje od 64×64 piksela uzimaju se u obzir distribucije na susednim poljima, čime se minimiziraju iznenadne promene intenziteta na prelazima između dva polja. U toku ekstrakcije se osim sjajnosti određuje dužina x_0 , širina y_0 , površina i perimetar bele oblasti (slika 3.13.c). Na poslednjoj etapi klasifikuje se vektor (opis) izdvojenih parametara (x_0 , y_0 , površina, perimetar, intenzitet) i poredi sa standardnim vektorom za datu klasu oblika belih oblasti. Standardni vektor, na primer, može da ima srednje vrednosti po svim parametrima. Baza podataka o standardnim vektorima inovira se treniranjem sistema pomoću posebnog programa. Nakon što ustanovi da aktuelni vektor pripada određenoj klasi, program za treniranje računa nove srednje vrednosti parametara standardnog vektora i unosi ih u bazu podataka. Oblici koji su suviše deformisani, kao na primer u slučaju dva spojena oblika, ne mogu se klasifikovati i odbacuju se.

Nakon što se odrede bele oblasti (0,5–1 mm) sa bakterijama za rasadijavanje, xyz pozicioner postavlja (sa rezolucijom od $15 \mu\text{m}$) manipulator sa sterilnom hvataljkom iznad tih oblasti. Veća rezolucija nije potrebna jer je veličina radnog prostora koja se vidi iz jednog piksela (neposredno vidno polje):

$$\text{IFOV} = \frac{100 \text{ mm}}{512} \times \frac{100 \text{ mm}}{512} = 0,2 \text{ mm} \times 0,2 \text{ mm}. \quad (6.25)$$

Tačnost izdvajanja, tj. razlikovanja belih oblasti od plavih je 98%, a belih od podloge je 90%, što je bolje nego kod manuelnog postupka. Za procesiranje slike po jednoj Petrijevoj posudi potrebno je oko 100 s. Za pozicioniranje manipulatora, uzimanje bakterija hvataljkom i prenos do ćelije za rasadijavanje (25 ćelija po jednoj posudi) ukupno je potrebno desetak sekundi. Za to vreme pomoćni robot odnosi sa pozicije D obrađenu posudu iz prethodnog ciklusa i postavlja novu posudu na poziciju A.

6.3. KARAKTERISTIKE SENZORA VIZIJE

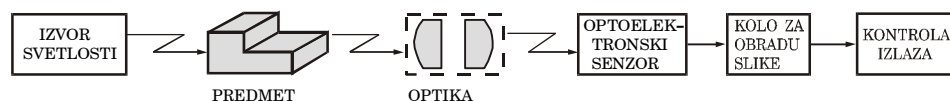
6.3.1. Principi gradnje

Senzor vizije je optoelektronski sistem vizije koji pretvara optičko zračenje u sliku ili u električni signal. Kod aktivnog senzora vizije predajnik emituje u okolinu svetlost određene talasne dužine, a prijemnik na toj istoj talasnoj dužini prima reflektovanu svetlost iz okoline. Pasivni senzor vizije ima samo prijemnik svetlosti osetljiv na optičko zračenje okoline ili na reflektovano zračenje od okoline koje potiče od drugih izvora.

Razvojni put senzora vizije počinje primenom optoelektronskih senzora blizine da bi se nastavio izgradnjom optoelektronskih nizova i 2D-matrica. Današnje stanje karakteriše se primenom televizijske kamere kao fundamentalnog senzora u sistemima vizije i nastojanjima da se vizija ostvari pomoću lasera i optičkih vlakana.

Struktura senzora vizije. U strukturi senzora vizije mogu se izdvojiti komponente (slika 6.14):

- optički elementi (ogledalo, prizma, sočivo, filter, delitelj zračenja);
- optoelektronski senzor zajedno sa elektronskim kolima za primarnu obradu signala (prepojačavač, U/I konvertor, mehanizam za hlađenje);
- kola za obradu signala slike (multiplekser, A/D pretvarač, mikroprocesor) i prateći softver;
- upravljačka jedinica za koordinaciju rada delova sistema i vezu sa displejom;
- izvor osvetljenja, koji nije doslovno deo senzora vizije, ali jeste komponenta bez koje se ne može kompletirati slika objekta.



Slika 6.14. Strukturna blok-šema senzora vizije

Parametri navedenih komponenti senzora vizije određuju se u zavisnosti od toga šta je cilj vizije i kako se definiše scena. Cilj vizije može biti detekcija, prepoznavanje ili identifikacija objekta, u realnom vremenu ili kasnije, sa slikom na displeju ili bez nje, sa senzorom vizije koji treba da ima određenu dugovečnost, veličinu, težinu i dr.

Radna okolina ili scena koja podleže viziji je prirodna ili veštačka (kontrolisana) i proučava se posebno za svaki konkretni slučaj. Razlog je u velikom broju karakteristika:

- radnog objekta (spektralna karakteristika, temperatura, dimenzije, oblik, lokacija);
- ambijenta (temperatura, broj i raspored svetlosnih izvora);
- pozadine (konfiguracija, atmosfera, veličina, spektralna karakteristika);
- načina posmatranja (opseg – maksimalna i minimalna udaljenost od objekta, neposredni i ukupni vidni ugao, rezolucija);
- dinamike senzora vizije i okoline (relativno pomeranje i brzina, brzina uzorkovanja scene radi procesiranja).

Procesor obrađuje signal radi izdvajanja vizuelne informacije, pri čemu se moraju jasno definisati elementi informacije i algoritmi njihovog izdvajanja. U praksi postoji veliki broj algoritama sa različitim koncepcijama obrade signala. Većina je prilagođena određenoj hardverskoj strukturi senzora vizije, a manji broj ima univerzalni karakter.

Piksel (eng. *pix*(pictures) + *element*) jeste element slike dobijen pomoću jednog optoelektronskog senzora. Senzori vizije se razlikuju prema tipu upotrebljenih senzora. Ukupan broj piksela u ravni fokusa daje se matricom kolona×vrsta, pri čemu je odnos broja kolona i broja vrsta najčešće 1:1, a može biti 2:3 ili 3:4.

Vidno polje je deo scene koji senzor vizije detektuje sa rastojanja r . Na osnovu ove definicije vidno polje može da se predstavi kao:

- *Totalno vidno polje* TFOV (*Total Field of View*, tj. pravougli radni prostor dimenzija $x \times y$ koji senzor vizije detektuje sa nominalnog rastojanja r_{nom} :

$$\text{TFOV} = x \times y [\text{m}]. \quad (6.26)$$

Na primer, tipična vrednost je $\text{TFOV}=0,2 \times 0,2 \text{ m}$ za $r_{\text{nom}}=0,5 \text{ m}$.

- *Totalno vidno polje izraženo kao ugao* iz kojeg senzor vizije detektuje radni prostorog $x \times y$ sa rastojanja r_{nom} :

$$\text{TFOV} = \left(\frac{x}{r_{\text{nom}}} \right) \times \left(\frac{y}{r_{\text{nom}}} \right) [\text{rad}]. \quad (6.27)$$

Na primer, za $x \times y = 0,2 \times 0,2 \text{ m}$ i $r = r_{\text{nom}} = 0,5 \text{ m}$ dobija se da je $\text{TFOV} = (0,2 \text{ m} / 0,5 \text{ m}) \times (0,2 \text{ m} / 0,5 \text{ m}) = 0,4 \times 0,4 \text{ rad}$.

- *Neposredno vidno polje IFOV (Instantaneous Field of View)*, tj. pravougli radni prostor kojeg detektuje jedan piksel pri nominalnom rastojanju između senzora vizije i objekta:

$$\text{IFOV} = x_p \times y_p = \frac{\text{TFOV}}{m \times n} = \left(\frac{x}{m} \right) \times \left(\frac{y}{n} \right) [\text{m}], \quad (6.28)$$

pri čemu je $m \times n$ format matrice piksela. Tipična vrednost za IFOV je $0,5 \times 0,5 \text{ mm}$ pri $r_{\text{nom}} = 0,5 \text{ m}$ i često se naziva rezolucijom senzora vizije. Na primer, za senzor vizije sa matricom $m \times n = 512 \times 512$ i $\text{TFOV} = 0,2 \times 0,2 \text{ m}$, dobija se $\text{IFOV} = 0,4 \times 0,4 \text{ mm}$.

- *Neposredno vidno polje izraženo kao ugao* pod kojim se detektuje deo radnog prostora $x_p \times y_p$ iz jednog piksela pri nominalnom rastojanju između vizisenzora i objekta:

$$\text{IFOV} = \left(\frac{x_p}{r_{\text{nom}}} \right) \times \left(\frac{y_p}{r_{\text{nom}}} \right) [\text{rad}], \quad (6.29)$$

Na primer, za $x_p \times y_p = 0,4 \times 0,4 \text{ mm}$ i $r_{\text{nom}} = 0,5 \text{ m}$ dobija se $\text{IFOV} = 0,8 \times 0,8 \text{ mrad}$.

Problem kontrasta i odnos signal/šum. Predmeti u radnom prostoru nisu uvek jasno uočljivi u odnosu na pozadinu, što otežava njihovo izdvajanje. Ovaj problem rešava se različitim tehnikama osvetljavanja prostora. Za identifikaciju objekta potreban je dobar kontrast, tj. visok odnos signal/šum (S/N). Najbolji rezultati u pogledu odnosa S/N dobijaju se kada je osvetljenje takvo da senzor radi na polovini dinamičkog opsega. Većina kamera pri tipičnom (nominalnom) osvetljenju 2–5 lm/m ima visok odnos S/N: 80–200.

6.3.2. Tehnike osvetljavanja

Problem osvetljavanja radnog prostora u robotici potenciran je činjenicom da radni predmet, okolina, senzor, robot i izvor svetlosti mogu da se kreću – zajedno ili pojedinačno. Raspored i intenzitet izvora svetlosti određuju se analizom mehaničkih i optičkih parametara svih delova scene. Od rešenja donetih na ovoj etapi zavisi izbor karakteritika senzora vizije.

Frontalno ili direktno osvetljenje radnog prostora primenjuje se kada karakteristike radne površine mogu da se upotrebe kao svojstvo slike (slika 6.15.a). Na taj način izdvajaju se tamne i svetle zone (binarna detekcija) ili zone sa skalom sivih tonova (analogno/digitalno procesiranje).

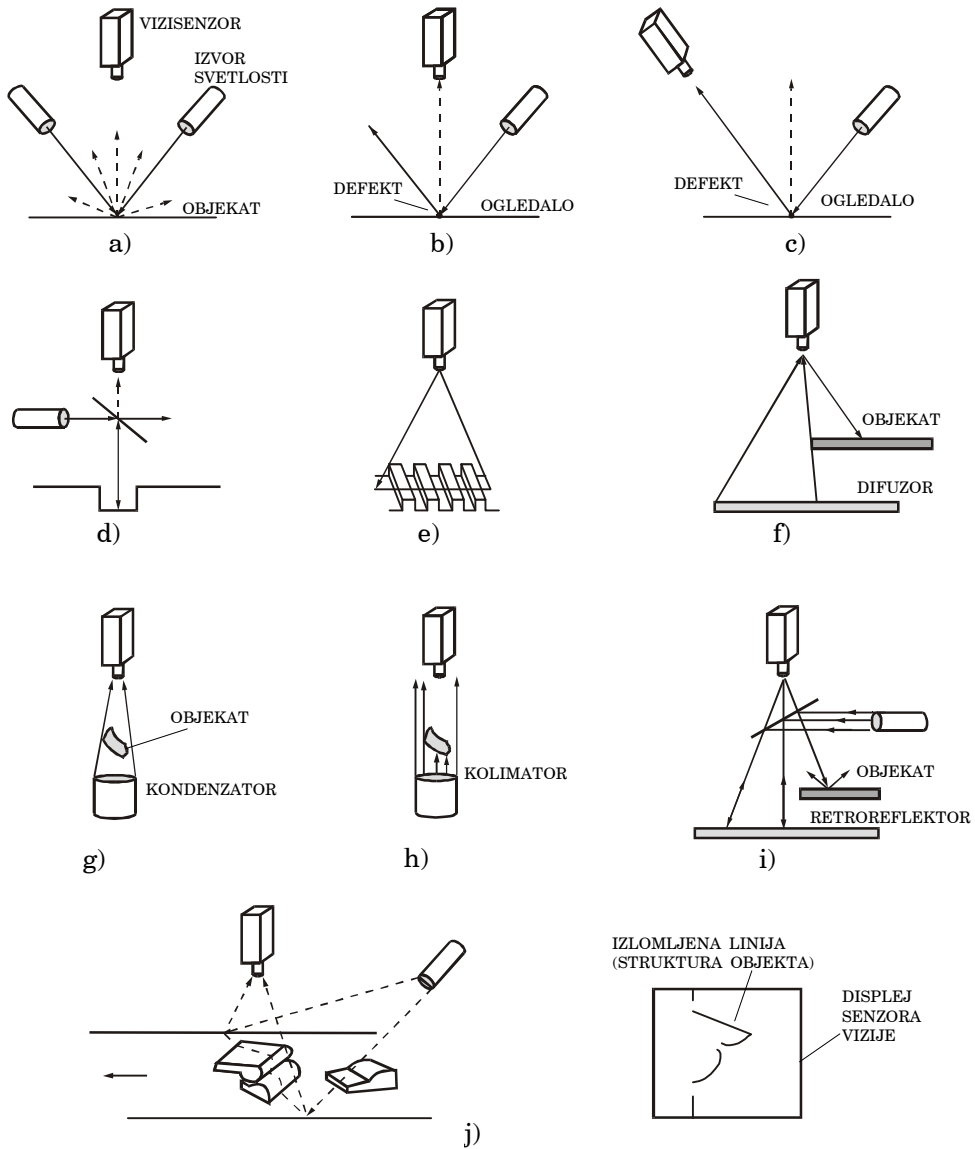
Ogledalske površine. Osvetljavanje površina sa izrazitom refleksijom (ogledalske površine) provodi se radi detekcije tamnih mrlja (defekata). Senzor vizije i izvor svetlosti mogu se tada postaviti na dva načina. U prvom slučaju senzor vizije prima svetlosni signal samo pri nailasku defekta, a u drugom slučaju stalno prima svetlosni signal i gubi ga jedino pri nailasku defekta (slika 6.15.b,c).

Optički delitelj. Kada je potrebno osvetljenje duž optičke ose senzora, na primer kao kod detekcije udubljenja, može se upotrebiti optički delitelj (slika 6.15.d). U praksi se često detektuju izbočine i udubljenja pomoću njihovih senki, koje se dobijaju kada se izvor svetlosti postavi na odgovarajući način (slika 6.15.e).

Elementi za prilagođavanje rasvete. Detekcija predmeta koji je između izvora i kamere odlikuje se visokim odnosom S/N. Izvor svetlosti tada je ploča sa difuznom svetlosti (difuzor), reflektor sa smanjujućim konusom (kondenzor) ili reflektor sa paralelnim zracima (kolimator), (slika 6.15.f,g,h). Kada su izvor svetlosti i senzor vizije sa iste strane u odnosu na objekat, tada je neophodan retroreflektor – optičko sredstvo koje reflektuje upadnu svetlost u istom pravcu odakle je svetlost došla (slika 6.15.i).

Strukturno svetlo je tehnika osvetljavanja koja se u praksi mnogo primenjuje. Reč je o postupku kojim se generiše snop svetlosti u ravni, npr. pomoću specijalne laserske diode (LD) koja emituje svetlost u obliku lepeze ili pomoću obične LD i dugačkih cilindričnih sočiva. Kada se takvim snopom osvetli prazna konvejska traka, senzor vizije će detektovati pravu liniju poprečno

na traku. Nailaskom radnog objekta, senzor vizije detektuje jednu izlomljenu liniju koja ide po površini objekta, pri čemu linija ima prekide za mesta koja senzor ne vidi (mesta u seni), (slika 6.15.j).



Slika 6.15. Tehnike osvetljavanja: a) direktna metoda, b) ogledalo sa tamnim defektima (poljima), c) ogledalo sa svetlim defektima, d) optički delitelj, e) formiranje senki, f) difuzor, g) kondenzator, h) kolimator, i) retroreflektor, j) struktorno svetlo

Prikaz objekta, tj. prikaz njegove geometrijske strukture (odatle naziv metode), ponavlja se u slojevima čiji broj zavisi od frekvencije uzorkovanja. Programskim sredstvima provodi se završna obrada i dobijanje konačne slike objekta iz niza slojeva. Složeniji programi omogućavaju izdvajanje predmeta i u slučaju njihovog međusobnog preklapanja.

6.3.3. Veličina senzorske matrice i parametri senzora vizije

Određivanje veličine senzorske matrice u ravni fokusa tako da se dobije željena rezolucija nije jednostavno jer treba uzeti u obzir relativno kretanje senzora vizije i radne okoline. Tipičan primer je identifikacija radnih predmeta na pokretnoj traci (slika 6.16.a). Na osnovu podataka datih na slici definišu se sledeći parametri: vreme detekcije okvira, vreme obrade slike, dimenzije vidnog polja, broj piksela, žižna daljina, dimenzija piksela i dimenzija matrice

Vreme detekcije okvira t_o . Okvir je 2D-slika dobijena sekvencijalnim skeniranjem, pri čemu svaki piksel učestvuje samo jednom. Ukupno vreme skeniranja jeste vreme detekcije okvira. Poželjno je da ovo vreme bude 40 ms, što odgovara standardnom televizijskom sistemu sa 25 slika u sekundi. Za vreme t_o traka koja se kreće brzinom $v=0,1$ m/s pređe put

$$d=t_o \cdot v=0,040 \text{ s} \cdot 0,1 \text{ m/s}=4 \text{ mm.} \quad (6.30)$$

Vreme obrade slike t_s . Stvarna slika veća je od jednog okvira a manja od vidnog polja. U smeru trake slika ima dužinu

$$d_s= t_s \cdot v, \quad (6.31)$$

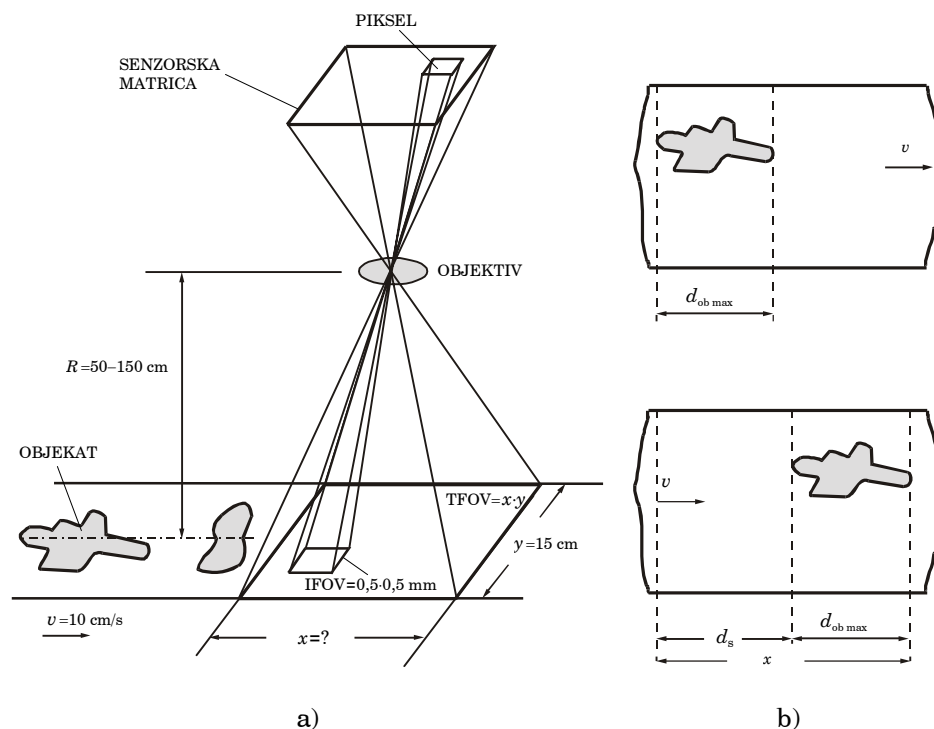
gde je t_s vreme za koje se obavi izdvajanje i kompletna obrada slike dužine d_s na traci koja se kreće brzinom v u odnosu na senzor.

Dimenzije vidnog polja $x \times y$. Vidno polje poprečno na pokretnu traku ograničeno je širinom trake $y=15$ cm. Njegova dimenzija x duž trake određuje se na osnovu zahteva da i najveći objekat ($d_{\text{ob max}}=4$ cm) bude unutar vidnog polja (slika 6.16.b):

$$x=d_s+d_{\text{ob max}}=t_s \cdot v+d_{\text{ob max}}. \quad (6.32)$$

Poželjno je da dužina vidnog polja x bude što veća jer se time obezbeđuje dovoljno veliko vreme potrebno za procesiranje slike t_s . S druge strane, senzorska matrica u fokusnoj ravni ima format 1×1 , 2×3 ili 3×4 . Zavisno od izbora formata i orijentacije matrice najmanja vrednost za x biće $x_{\min} = (2/3) \cdot y = 10$ cm, a najveća $x_{\max} = (4/3) \cdot y = 22,5$ cm. Zbog vremena obrade t_s najbolje bi bilo odabrati maksimalnu vrednost $x_{\max} = 22,5$ cm, ali se uzima manja vrednost $x = 20$ cm da bi se dobio odnos širine i dužine vidnog polja $y : x = 3 : 4$ kompatibilan sa formatom ekranskih displeja.

Prema tome, dimenzije ukupnog vidnog polja TFOV na mestu objekta jesu 15×20 cm, dimenzije neposrednog vidnog polja IFOV jesu $0,5 \times 0,5$ mm (dato kao rezolucija), a vreme procesiranja slike $t_s = (20 - 4) / 10 = 1,6$ s. Moguće je da se neki objekat pojavi i na početku i na kraju vidnog polja, ali se tokom obrade slike ovo dupliranje lako eliminiše.



Slika 6.16. Objekti na pokretnoj traci: a) geometrijski odnosi, b) zavisnost ukupnog vidnog polja TFOV od vremena procesiranja t_s

Broj piksela u senzorskoj matrici. Vidno polje može se predstaviti i u jedinicama ugla, ali tada treba imati u vidu da će

veličina vidnog polja zavisi od rastojanja senzora vizije od pokretne trake. Ako ta udaljenost varira, na primer, od $R_{\min}=50$ cm do $R_{\max}=150$ cm, tada maksimalnom rastojanju R_{\max} odgovara minimalna ugaona rezolucija $\text{IFOV}_{\min}=0,5 \times 0,5 \text{ mm}/150 \text{ cm} = 33 \times 0,33 \text{ mrad}$, a minimalnom rastojanju R_{\min} najveća vrednost vidnog polja $\text{TFOV}_{\max}=15 \times 20 \text{ cm}/50 \text{ cm} = 300 \times 400 \text{ mrad}$. Ukoliko obadva ekstrema treba istovremeno zadovoljiti, senzorska matrica bi trebalo da ima

$$\frac{\text{TFOV}_{\max}}{\text{IFOV}_{\min}} = \frac{300 \cdot 400 \text{ mrad}}{0,33 \cdot 0,33 \text{ mrad}} = 900 \times 1200 \quad (6.33)$$

piksela. To je relativno veliki broj jer standardna matrica ima format do 512×512 . Ako se u konkretnom primeru za nominalnu udaljenost odabere $R=100$ cm, tada odnos $\text{TFOV}:\text{IFOV}$ daje matricu prihvaljivog formata od 300×400 piksela.

Optički parametri. Broj piksela za razmatrani primer je fiksiran na 300×400 , pa između R_{\min} i R_{\max} još treba odrediti žižnu daljinu. Na osnovu prethodnih podataka, može se odabrati objektiv $f(2,0)$ sa žižnom daljinom od 100 mm.

Dimenzija piksela i matrice. Za nominalno rastojanja od 100 cm prostorna rezolucija $0,5 \times 0,5 \text{ mm}/100 \text{ cm} = 0,5 \times 0,5 \text{ mrad}$. Ovakva prostorna rezolucija u ravni fokusa daje dimenzije jednog piksela: $0,5 \times 0,5 \text{ mrad} \cdot 100 \text{ mm} = 50 \times 50 \text{ } \mu\text{m}$. Za pravljenje piksela takvih dimenzija postoje dobro razrađene poluprovodničke tehnologije.

6.4. ELEKTRONSKE KAMERE

6.4.1. Vidikon kamere

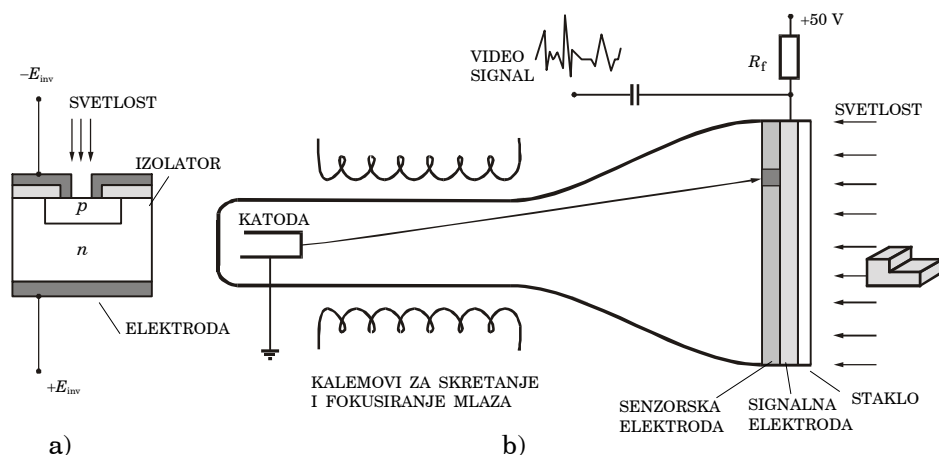
Cevni senzori slike baziraju se na primeni elektronske vakuumske cevi. Zagrijana katoda fotoemisijom oslobađa mlaz elektrona čije se skretanje i fokusiranje upravlja elektromagnetskim poljima, tj. pomoću kalemova postavljenih sa vanjske strane cevi – duž puta od katode do prednjeg staklenog zida.

Sa unutrašnje strane staklenog zida nanet je proziran metalni sloj (signalna elektroda) i preko njega fotoprovodni sloj (senzorska elektroda). Zavisno od vrste fotoprovodnog sloja postoje različiti tipovi kamere: vidikon (antimonid-sulfid Sb_2S_3), plumbikon (olovni

oksid PbO naparen na oksidu kalaja SnO), satikon (Sb_2S_3 na osnovi od selen-arsenida SeAs i selen-arsenid-telurida SeAsTe), njuvikon (Sb_2S_3 na osnovi od cink-kadmijum-telurida SeAsTe i cink-selenida ZnSe) i dr. U literaturi se za sve kamere na bazi elektronskih cevi često upotrebljava generičko ime vidikon (elektronska vakuumska cev kamere)

Elementarna površina senzorske elektrode ponaša se kao fotoprovodnik, tj. fotodioda. Standardna fotodioda sastoji se od osnove poluprovodnika n -tipa na čijoj je površini difuzijom naneto ostrvo p -tipa i metalnih elektroda kojima je fotodioda inverzno priključena na naponski izvor (6.17.a). Zbog inverzne pretpolarizacije na pn spoju nastaje prelazna oblast koja ima veliku otpornost. Kada nema upada vanjske svetlosti, struja fotodiode je mala – do 10 nA (struja mraka). Ukoliko se dioda osvetli, otpornost prelazne oblasti se smanjuje i vrednost struje raste. Na taj način fotodioda se ponaša kao fotoprovodnik čiju otpornost moduliše intenzitet svetlosti.

PIN fotodioda ima između p i n -sloja nedopirani i -sloj (eng. *intrinsic*). Time se povećava otpornost prelaznog sloja, dobija se osetljivost na širi optički spektar i veća brzina odziva. Prednost silicijumskih fotodiode je mogućnost njihovog pakovanja sa prostornom rezolucijom od 10–15 μm .



Slika 6.17. Cevni senzori slike: a) fotodioda, b) vidikon

Vidikon je kamera na bazi elektronske vakuumske cevi sa senzorskom elektrodom od Sb_2S_3 (slika 6.17.b). Na samom početku rada vidikona uspostavlja se elektronski mlaz i fotoprovodni sloj preko signalne elektrode i fiksnog otpornika R_f priključuje na

pozitivni potencijal +50 V. Pomoću otklonskog sistema elektronski mlaz skenira celu površinu i zatvara strujno kolo preko katode na masu.

Ekvivalentno električno kolo za elementarnu površinu na senzorskoj elektrodi vidikona predstavlja se kao paralelni spoj kondenzatora C_{eq} i otpornika R_{eq} . Kod prvog skeniranja kondenzator C_{eq} puni se količinom elektriciteta do napona V_1 . Dok mlaz skenira ostali deo senzorske elektrode, kondenzator se prazni kroz R_{eq} do napona V_2 . Kada mlaz sledeći put dođe na isto mesto, kondenzator će se ponovo napuniti do V_1 , odnosno nastaje struja punjenja kondenzatora:

$$I_c = C_{eq} \frac{dV}{dt} = C_{eq} \frac{V_1 - V_2}{\Delta t} = k(V_1 - V_2). \quad (6.34)$$

Pošto se ekvivalentna otpornost R_{eq} menja zavisno od intenziteta upadne svetlosti E_{in} , na isti način će se menjati i razlika napona $V_1 - V_2$, odnosno struja I_c :

$$I_c = kE_{in}. \quad (6.35)$$

Ukupna vrednost struje kondenzatora dobiće se dodavanjem struje mraka I_{dc} :

$$I = I_c + I_{dc} = kE_{in} + I_{dc}. \quad (6.36)$$

Struja I je nelinearna jer je takav i fotoprovodni efekt, što se uzima u obzir pomoću faktora distorzije γ :

$$I = (kE_{in})^\gamma + I_{dc}. \quad (6.37)$$

Izlazni signal uzima se sa otporničkog delitelja napona koga čine fiksni otpornik R_f i fotodioda, tj. elementarna površina na koju pada elektronski mlaz:

$$V = I \cdot R_f. \quad (6.38)$$

Za neosvetljenu fotodiodu izlazni signal je približno nula, a za osvetljenu je proporcionalan intenzitetu svetlosti – sa dinamičkim opsegom do 1000:1. Faktor distorzije je za vidikon $\gamma \approx 0,65$. Zaostalo naelektrisanje koje potiče od prethodne slike treba da je što manje. To se postiže malom kapacitivnošću C_{eq} , odnosno debljinom fotoprovodnog sloja $\approx 20 \mu\text{m}$. I pored toga vidikon ima izraženu inerciju (80 ms). Rezolucija, tj. razlikovanje dveju susednih tačaka na

senzorskoj elektrodi zavisi od brzine skeniranja v i površine poprečnog preseka elektronskog mlaza. Ako zrak ima pravougli presek dužine l , granična frekvencija skeniranja koja daje najbolju rezoluciju je

$$f_c = v/l. \quad (6.39)$$

Kao što je istaknuto, postoje različiti tipovi senzorskih elektroda. Najnovije tehnologije omogućavaju gusto pakovanje matrice fotodioda, odnosno p -ostrva, koji se pomoću elektronskog mlaza pri skeniranju spajaju na masu. Međutim, bez obzira na poboljšanja, cevni senzori slike su veći, osetljiviji su na vibracije i udare, imaju kraći vek trajanja i manju pouzdanost od poluprovodničkih CCD senzora.

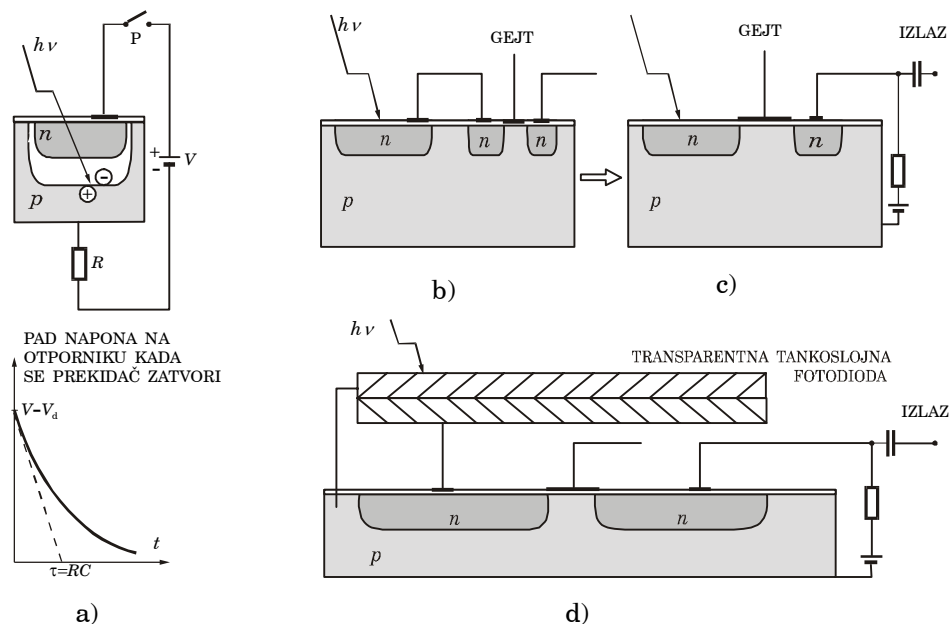
6.4.2. Poluprovodničke (CCD) kamere

Poluprovodničke kamere napravljene su početkom 60-tih godina na bazi nizova fotodioda. Današnje kamere sa CCD elementima kao sensorima slike nastale su 1973. Princip rada ovih elemenata zasniva se na konverziji fotona u naelektrisanje. Kada foton svetlosti talasne dužine $\lambda < 1 \mu\text{m}$ uđe u silicijum, nastaje par elektron-šupljina. Ako postoji električno polje u silicijumu, doći će do razdvajanja elektrona od šupljina i nastaje fotostruja. To je mala struja i za praktičnu upotrebu ona se mora integrisati do merljivog iznosa naelektrisanja. Opisana konverzija može se ostvariti pomoću n^+p fotodiode ili MOS kondenzatora.

Fotodiode i senzorska matrica. Slika 6.18.a ilustruje rad fotodiode u fazi akumulacije naelektrisanja. Kada se prekidač P zatvori, pozitivni prednapon V priključen je na n^+ -oblast diode, dioda je inverzno polarisana i nastaje ispražnjena zona. Širina (dubina) prelazne oblasti zavisi od napona prepolarizacije. Ako se prekidač otvori i dioda osvetli, generisani parovi elektron-šupljina se razdvajaju i elektroni akumuliraju u kondenzatoru što ga čini ispražnjena zona ($\approx 1 \text{ pF}$), a napon diode V_d smanjuje se u odnosu na početni V . Vreme ekspozicije mora biti kratko da ne bi došlo do akumulacije naelektrisanja nastalog usled termičkog efekta. Vreme ekspozicije za jedan piksel je od 50 ns do 1 μs , odnosno za celu matricu 512×512 iznosi 10–250 ms. Posle isteka vremena ekspozicije, prekidač P ponovo se zatvara i kako je $V_d < V$, kroz

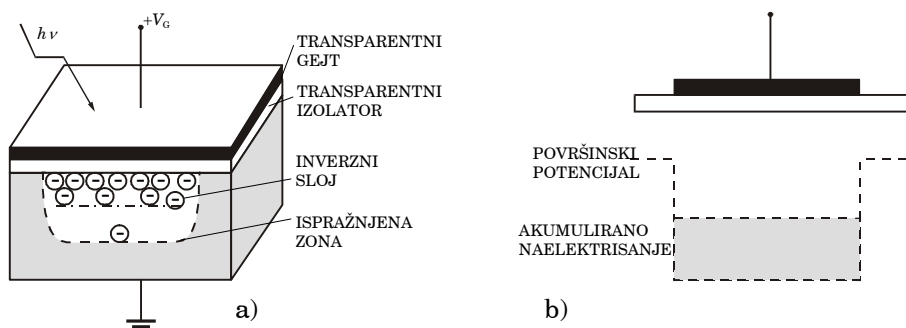
otpornik R nastaje struja resetovanja koja uspostavlja staro stacionarno stanje. Maksimalna vrednost ove struje proporcionalna je razlici napona $V_d - V$, odnosno intenzitetu upadne svetlosti. Opisano električno kolo realizuje se u integrisanoj tehnici tako da se prekidač P zameni sa FET tranzistorom (slika 6.18.b).

Kada su dioda i FET tranzistor od istog materijala, na primer od silicijuma, tada dioda može da se napravi kao sors FET-a i da se dobije FET fototranzistor (slika 6.18.c). Tipične dimenzije jednog piksela su $15 \times 15 \mu\text{m}$. Nedostatak ovih kola je što gejti i drejni zauzimaju veći deo površine senzora, obično 60–70%. Aktivna površina mnogo je veća kada se fotodioda deponuje u tankom sloju na silicijumsku osnovu (slika 6.18.d).



Slika 6.18. Fotodioda: a) rad u režimu akumulacije fotonaelektrisanja, b) fotodioda i FET, c) fotodioda kao deo FET-a, d) tankoslojna fotodioda i FET

MOS kondenzator i senzorska matrica. MOS kondenzator je jednostavniji i ima veći kapacitet od fotodiode iste veličine. Kondenzator se sastoji od metalne elektrode, termički oksidovanog silicijumskog sloja (oksid, dielektrik) i osnovnog poluprovodničkog sloja p ili n -tipa. Elektroda i dielektrik su transparentni, tako da svetlost prolazi do osnove (slika 6.19).



Slika 6.19. MOS kondenzator kao fotoelement: a) presek, b) šematski prikaz potencijalnog udubljenja sa akumuliranim naelektrisanjem

Kada je osnova *p*-tipa i kada se na gejt (elektrodu) priključi pozitivni napon određenog iznosa, na površini osnove nastaje ispražnjena oblast od šupljina kao većinskih nosilaca. Upadom fotona stvaraju se parovi elektron-šupljina, koji se razdvajaju pod delovanjem postojećeg električnog polja. Elektroni kao manjinski nosioci akumuliraju se na kontaktu između dielektrika i osnove formirajući inverzni sloj, čime se smanjuje dubina ispražnjene zone. Vreme čuvanja fotonelektrisanja, slično kao kod fotodiode, limitirano je termičkim generisanjem naelektrisanja. Struja rekombinacije kroz Si osnovu koja se javlja posle isključivanja napona na gejtu služi za neposredno očitavanje akumuliranog fotonelektrisanja.

Očitavanje akumuliranog naelektrisanja sa CCD elemenata senzorske matrice je daljinsko. Zbog velikog broja piksela (tipično 512×512) očitavanje se realizuje u tri etape:

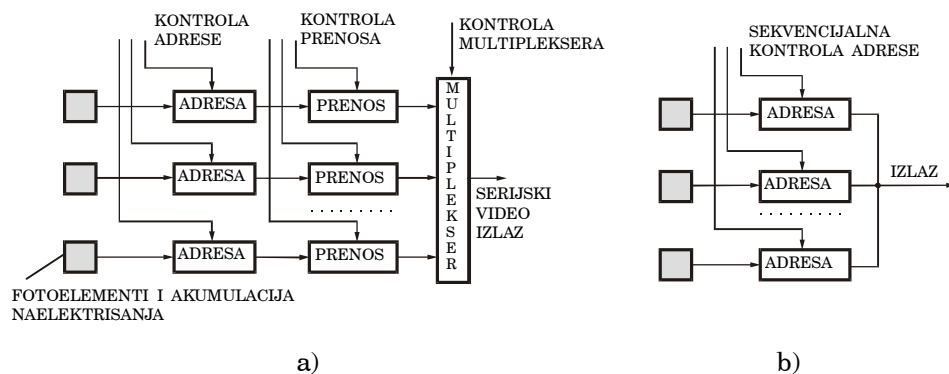
- adresiranje, kojim se pristupa fotoelementu i resetuje postojeće naelektrisanje;
- prenos naelektrisanja (ili informacije koja mu je proporcionalna) od fotoelementa do multipleksera;
- multipleksiranje, kojim se paralelna informacija dobijena sa $n \times m$ fotoelemenata pretvara u serijski video signal.

Na slici 6.20.a prikazan je principijelni dijagram daljinskog očitavanja sa matrice fotoelemenata. Savremene realizacije očitavanja bazirane su na integrisanim kolima za adresiranje, prenos i multipleksiranje sa odgovarajućim međuvezama. Posebna pažnja usmerena je na dobijanje jednostavnijeg adresiranja i prenosa, kombinovanje funkcija i optimizaciju veza.

Sekvencijalno adresiranje primenjeno u vidikon kamerama je najprostije (slika 6.20.b). Izlazni jednostruki provodnik služi za prenos fotonaelektrisanja, odnosno struje reseta, od adresnog kola do izlaza. Multipleksiranje se postiže sekvencijalnim adresiranjem zbog čega se ovaj način očitavanja označava kao adresni. Očitavanje je usklađeno sa kretanjem elektronskog mlaza po putanji skeniranja. Zrak se prvo kreće sleva nadesno duž prve vrste, zatim na isti način od jednog do drugog elementa druge vrste i tako odozgo nadole do poslednje vrste. Frekvencija horizontalnog skeniranja je:

$$f_H = \frac{\text{broj piksela u vrsti}}{\text{vreme aktivnosti jedne vrste} [\mu\text{s}]} [\text{MHz}], \quad (6.40)$$

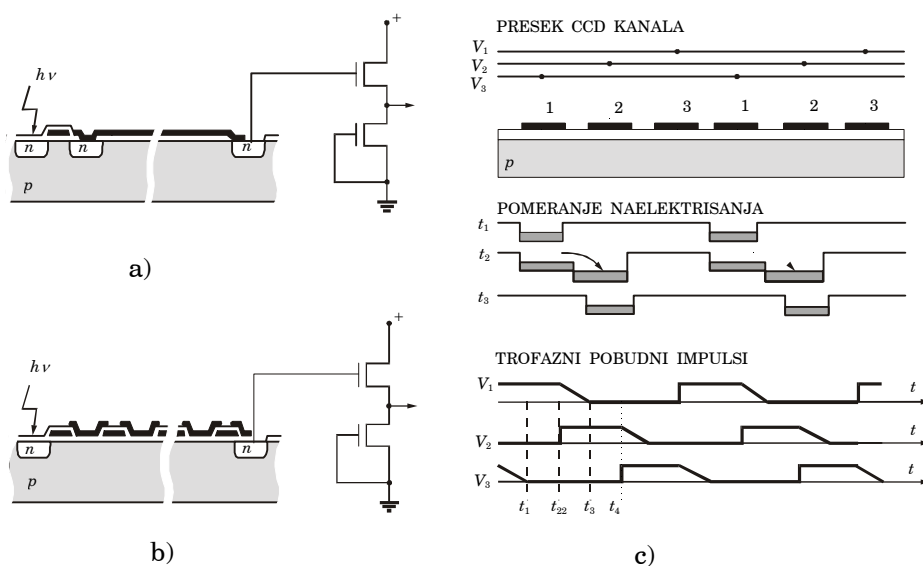
a frekvencija vertikalnog skeniranja f_V je iz tradicionalnih razloga usklađena sa frekvencijom napojne mreže od 50 Hz, odnosno trajanje jedne slike je 40 ms. TV kamere sistema PAL (*Phase Alternation Line*) imaju 625 vrsta (linija), pa je vreme aktivnosti jedne linije $40 \text{ ms}/625 = 64 \mu\text{s}$, odnosno linijska frekvencija je standardna i iznosi 15625 Hz. Prema tome, za kameru čija je matrica 500×582 dobija se da je frekvencija horizontalnog skeniranja $f_H = 500 / (64 \cdot 10^{-6}) = 7812500 \text{ Hz}$.



Slika 6.20. Očitavanje fotonaelektrisanja: a) principijelni funkcionalni dijagram, b) adresno očitavanje

Očitavanje sa pomeranjem akumuliranog naelektrisanja (CCD) odvija se bez elektronskog mlaza i karakteristično je za savremene poluprovodničke kamere. Priključivanje fotoelementa u multipleksiranom načinu rada može relativno jednostavno da se reši (slika 6.21.a). Fotoelement je spojen na prenosnu liniju preko MOS tranzistora. Njegov zadatak je da nakon određenog vremena potrebnog za integraciju, naelektrisanje sa fotoelementa propusti na

liniju za prenos. Na drugom kraju linije je pojačavač za detekciju napona na liniji. Osnovni problem pri multipleksiranom merenju naelektrisanja sa fotodiode ili MOS kondenzatora je visoka vrednost kapacitivnosti spojnih veza između fotoelementa i pojačavača, zbog čega slabi izlazni signal.



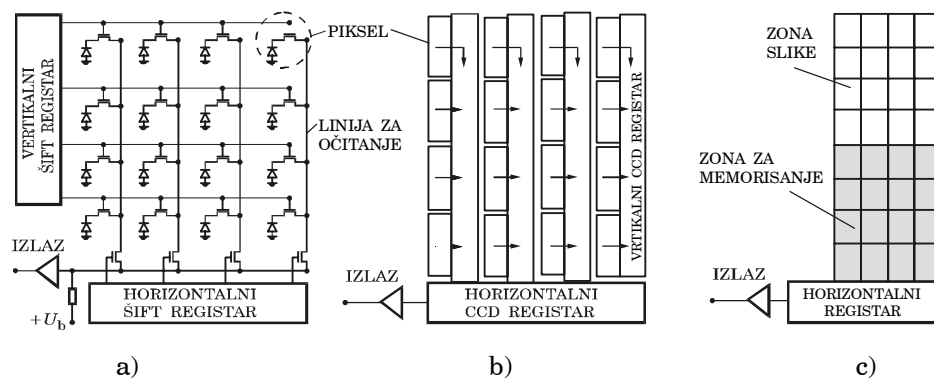
Slika 6.21. Očitavanje električnog naelektrisanja sa fotoelementa: a) MOS prekidač, b) CCD kanal, c) funkcionisanje trofaznog CCD kanala

Kada je linija prenosa niz MOS kondenzatora čije se prelazne oblasti delimično preklapaju i kada se elektrode ovih kondenzatora sukcesivno prespajaju odgovarajućim nizom naponskih impulsa, dolazi do serijskog pomeranja naelektrisanja od jednog do drugog kondenzatora sve do MOS pojačavača (slika 6.21.b). U literaturi se ovakav kanal prenosa označava kao CCD element (*Charge Coupled Device*). On ima malu kapacitivnost što omogućava dobijanje većeg izlaznog napona. Bolji odnos signal/šum i manje dimenzije kanala postižu se različitim profilom poluprovodnika i razmeštajem elektroda. Najprostiji je slučaj n -kanala sa dve grupe od po tri kondenzatora (slika 6.21.c). Elektrode svakog trećeg kondenzatora spojene su na zajednički provodnik. Kada se na elektrode 1 dovede pozitivni naponski impuls V_1 , ispod njih nastaju prelazne oblasti. Ako se delovanjem fotoefekta u trenutku t_1 u ove oblasti unesu negativna naelektrisanja, dubina oblasti proporcionalno se smanjuje. Nakon toga se u trenutku t_2 elektrode 2 pozitivno polarišu naponom V_2 tako da su prelazne oblasti ispod njih dublje nego kod susednih,

pa će zbog preklapanja akumulirano naelektrisanje ispod elektroda 1 preći u oblasti ispod elektroda 2. Ovaj prelazak ubrzava se smanjivanjem napona V_1 u intervalu $t_2 - t_3$, tako da se u trenutku t_3 naelektrisanje pomerilo za jedan elementarni pomeraj, tj. za jedan kondenzator. Ciklusi pomeranja ponavljaju se dalje na isti način. Zajedno sa barijerom koja sprečava bočno rasipanje naelektrisanja, površina po jednom pikselu je $25-40 \mu\text{m}^2$ za paket od 10^5 elektrona. Širina piksela je oko $2 \mu\text{m}$, a dužina desetak puta veća.

XY matrica. Postoji više načina na koji se fotoosetljivi elementi i elementi za očitavanje povezuju u 2D-matricu. Kod XY senzora, tj. kod XY adresiranja, piksel se sastoji od fotodiode i MOS tranzistorskog prekidača (slika 6.22.a). Gejtovi svih MOS tranzistora spojeni su na jednoj liniji, koja predstavlja vrstu 2D-matrice i koja se adresira vertikalnim šift registrom.

Kada se jedna takva linija adresiranjem dovede na pozitivni prednapon, sve fotodiode na toj liniji spajaju se na odgovarajuće vertikalne linije za očitavanje. Horizontalni šift registar paralelno prima podatke za očitavanje i na svome izlazu daje serijski video signal: vrstu po vrstu. Opisani prenos kontroliše se pomoću takt impulsa.



Slika 6.22. Tipovi 2D-matrice: a) XY senzor, b) IL senzor, c) FT senzor

IL matrica ili IL senzor (eng. *Interline Transfer*) karakterističan je po očitavanju sa međulinijским prenosom. IL senzor sastoji se od fotodiode ili MOS kondenzatora kao fotoosetljivih elemenata (slika 6.22.b). IL senzor sličan je XY senzoru, ali su vertikalne linije za očitavanje naelektrisanja zamenjene nizom CCD elemenata, koji tako formiraju vertikalni CCD registar. CCD registri su prekriveni slojem metala koji ga štiti od svetlosti. Nakon određenog vremena

integracije, paketi naelektrisanja sa fotoelemenata prenose se do vertikalnih CCD registara. U toku narednog perioda integracije vertikalni CCD registri paralelno predaju naelektrisanje, vrstu po vrstu, do horizontalnog CCD registra na čijem se izlazu dobija serijski video signal. IL senzor ima komplikovaniju strukturu i bolju osetljivost, mada se oko 70% upadne svetlosti reflektuje sa metalnih prekrivača na CCD registrima.

FT matrica ili FT senzor (*Frame Transfer*) karakterističan je po očitavanju sa prenosom cele slike. FT senzor sastoji se od većeg broja paralelnih CCD registara spojenih na zajednički horizontalni CCD registar za očitavanje (slika 6.22.c). Vertikalni CCD registri sastoje se iz dva dela. Prvi deo je fotoosetljiva oblast i označava se kao zona formiranja (detekcije) slike, a drugi deo koji je identičan prvome je zona memorisanja i zaštićena je od svetlosti. MOS kondenzatori u zoni formiranja služe za integraciju fotonaelektrisanja i za njegov brzi transfer u zonu memorisanja. Na kraju perioda integracije paketi naelektrisanja šalju se u zonu memorisanja, a u narednom periodu pomoću horizontalnog registra njen sadržaj iščitava se vrsta po vrsta i generiše izlazni video signal.

Prednost FT senzora je u jednostavnosti strukture piksela, što omogućava dvostruko bolju prostornu rezoluciju piksela nego kod XY ili kod IL senzora.

6.4.3. Kolor kamera

Mešanje svetlosti. Spektar svetlosti može se oblikovati aditivnim mešanjem primarnih boja: crvene R (*Red*, $\lambda=700$ nm), zelene G (*Green*, $\lambda=546,1$ nm) i plave B (*Blue*, $\lambda=435,8$ nm). Rezultantna svetlost definiše se:

- *Luminentnim signalom*, koji je proporcionalan sjajnosti:

$$Y=0,30R+0,59G+0,11B, \quad (6.41)$$

gde su R , G i B koeficijenti čije su vrednosti u intervalu 0–1. Rezultantna svetlost je crna kada su $R=G=B=0$, odnosno bela kada je $R=G=B=1$. Aditivni postupak mešanje je dodavanje svetlosne energije polazeći od tamnog ka svetlom, tj. povećava je vrednosti koeficijenta od 0 do 1.

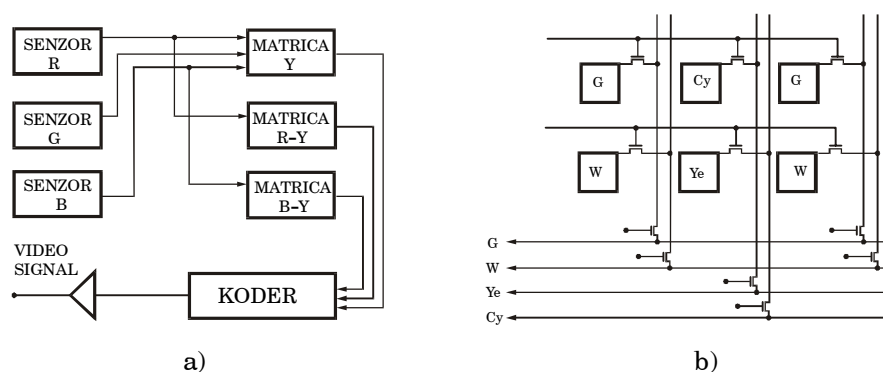
- *Hrominentnim signalima* (signali razlike boja), koji sadrže informaciju o vrsti i zasićenosti boje:

$$R-Y = 0,70R - 0,59G - 0,11B, \quad (6.42)$$

$$B-Y = -0,30R - 0,59G + 0,89B. \quad (6.43)$$

Spektar svetlosti može se oblikovati i suptraktivnim mešanjem komplementarnih boja: žute Y_e , cijana C_y i magente M_g . Ovaj tip mešanja realizuje se posebnim filterima. Kada bela svetlost dolazi na žuti filter, kroz njega prolaze samo crvena i zelena svetlost dok plavu apsorbira. Cijan filter propušta zelenu i plavu, a apsorbira crvenu svetlost. Magenta filter propušta crvenu i plavu, a apsorbira zelenu svetlost. Naizmenični polazak svetlosti kroz ova tri filtera omogućava da se izdvoje i prema potrebi modifikuju spektri boja R , G i B . Suptraktivno mešanje boja je za razliku od aditivnog dodavanje svetlosne energije od svetlog ka tamnom.

Kolor kamera je složenija od crno-bele jer ima senzore pomoću kojih se prvo detektuju primarne boje RGB (razlaganje svetlosti), zatim kola za računanje lumentnog signala Y i kola za računanje razlike boja $R-Y$ i $B-Y$, te koder za konačno formiranje izlaznog signala kolor slike (slika 6.23.a). Sensorna matrica sa RGB filterima sastoji se od fotodioda sa filterskim slojem R, G i B . Iščitavanje matrice je tipa XY , IL ili FT , pri čemu su filteri najčešće razmešteni mozaično.



Slika 6.23. Kolor kamera: a) principijelna blok-šema, b) XY matrica sa komplementarnim filterima

Na slici 6.23.b prikazana je XY matrica kod koje je svako elementarno polje (piksel) određeno sa četiri fotodiode (filtera): W (hite), G (reen), C_y (an) i Y_e (llow). Fotodiode su povezani tako da postoje dve vertikalne linije za iščitavanje njihovog naelektrisanja i ukupno četiri izlazne video linije. U jednom ciklusu sumiraju se

izlazni signali koji odgovaraju dvema susednim fotodiodama po vertikali $G+W$ i $Cy+Ye$, pa je rezultat uvek približno jednak standardnom luminentnom signalu $2G+R+B$. Kod IL matrica kolor filteri RGB poredani su u mozaičku strukturu, koja se iščitava u tri ciklusa: u prvom ciklusu iščitavaju se parne linije, u drugom neparne, a u trećem ciklusu formira se video izlaz kao kombinacija prethodna dva signala. Kod FT matrice u svakoj vertikalnoj liniji postoje nezavisni registri za svaku primarnu boju, tako da se luminentni signal formira multipleksiranjem odgovarajućih izlaza R , G i B .

6.4.4. Adaptacija komercijalnih kamera

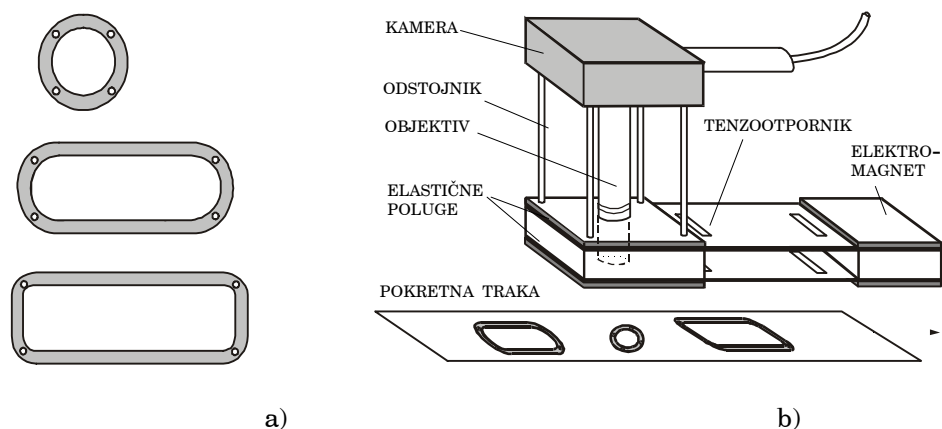
Najrasprostranjeniji senzori vizije u robotici su različite verzije minijaturnih kamera. To su uređaji namenjeni za televiziju i film, a sa određenim modifikacijama u konstrukciji primenjuju se u robotici.

Kamera je obično postavljena iznad radne oblasti radi praćenja operacija manipulatora, čime se imitira čovekov pogled na ruke tokom rada. Nedostaci ove jednostavne metode su paralaksa (nepodudarnost ose senzora vizije i ose robota), složene transformacije koordinata i dugo vreme kalibracije referentnog sistema robot-kamera. Savremene minijaturne kamere relativno lako se ugrađuju u šaku robota (*eye in hand*). U tom slučaju paralaksa se eliminiše automatskim pozicioniranjem šake sa kamerom tačno na centralnu osu objekta, a transformacija koordinata svodi se na korekciju za iznos rastojanja između šake i kamere, pri čemu je to rastojanje određeno dimenzijama odstoynika na kome je pričvršćena kamera. Potrebna prostorna rezolucija može se ostvariti pomoću senzora manje rezolucije nego u slučaju kada je kamera iznad robota.

Tipični parametri minijaturnih kamera su: dimenzije od $2,5 \times 2 \times 3$ cm do $5 \times 5 \times 10$ cm, broj piksela od 128×128 do 500×582 , optoelektronskih senzora, veličina senzorskog čipa po vertikali i horizontali od $4,5(V) \text{ mm} \times 6(H) \text{ mm}$ do $6,4(V) \text{ mm} \times 7,84(H) \text{ mm}$, vertikalna sinhronizacija 50 Hz ili 60 Hz ($15\,625 \text{ kHz}$ ili $15\,734 \text{ kHz}$), merni opseg 10–100 cm, objektiv sa žižnom daljinom 5–20 mm, napajanje jednosmerno 10 V ili naizmenično 220 V, maksimalna struja 150–200 mA, izlazna impedansa 75Ω , priključni kabl za

napajanje i spajanje sa monitorom 2–4 m, izlazni video signal 1 V_{pp}, težina 200–400 g, neosetljivost na vibracije do 2 kHz, radno temperaturno područje od –10 °C do +60 °C.

Primena adaptirane kamere u asembliranju. Položaj i orijentacija predmeta na radnoj površini imaju slučajni karakter. Manipulator vođen kamerom treba da locira predmet, da ga podigne i montira na odgovarajuće mesto. Neka su u pitanju, na primer, kružni, eliptični ili pravougaoni metalni komadi sa četiri otvora (slika 6.24.a), koje treba montirati na armaturu sa četiri šiljka (zavrtnja). Za realizaciju ovog zadatka na manipulator je ugrađena minijaturna kamera sa širokougaonim objektivom. Originalno kućište kamere predstavlja skoro polovinu njene težine i može se zameniti lakšim. Objektiv sa optoelektronskim senzorima i ploča sa elektronskim kolima rotirani su za 90° da bi objektiv bio okrenut prema radnoj površini. Dve elastične ploče od berilijumove bronzne omogućavaju izvesno vertikalno pomeranje (5–10 mm) bez rotacionog i horizontalnog pomeranja. Na slobodnom kraju ploča je elektromagnet koji podiže radne komade težine do 0,5 kg (slika 6.24.b).



Slika 6.24. Adaptacija minijaturne kamere: a) izgled radnih komada, b) manipulator sa kamerom

U toku kalibracije prave se slike radnih predmeta u različitim položajima i pamte u memoriji. Slika je definisana sa četiri karakteristična otvora na obodu predmeta. Uz svaku sliku pamte se i odgovarajući položaji manipulatora: položaj u kome je predmet uočen i položaj u kome je predmet podignut. Na taj način formira se

datoteka idealnih radnih predmeta. Kada se u vidnom polju kamere nađe deo radnog predmeta, manipulator se pomera do ose predmeta određene presekom dijagonala povučenih kroz otvore, slika predmeta se poredi sa idealnom i koriguje pomeranje manipulatora sve dok se ne postigne detekcija predmeta sa određenom tačnošću ($\pm 0,5$ mm translatorno i $\pm 5^\circ$ rotaciono). Nakon toga manipulator podiže radni predmet i asemblira ga na armaturu sa četiri šiljka. Prvo se uklapa jedan otvor, a zatim njemu dijagonalan. Kada je drugi korak neuspešan, pri spuštanju manipulatora dolazi do naprezanja berilijumovih ploča, što se meri tenzootpornicima. Tenzootpornici ovde predstavljaju rudimentirani taktilni senzor i njihovi izlazi služe za finu korekciju uklapanja.

6.5. 3D-VIZISENZORI

6.5.1. Metode 3D-vizije

Senzori vizije bazirani na standardnim kamerama konvertuju svetlosni signal $s(x,y,z)$ u dvodimenzionalnu sliku $f(x,y)$. Za trodimenzionalnu viziju neophodna je informacija o dubini prostora z , odnosno mora se meriti rastojanje od senzora vizije do svake tačke scene. Za ovu namenu razvijene su ili prilagođene tri grupe metoda:

- *Direktne/indirektne.* Metode zasnovane na neposrednoj viziji su direktne, a metode zasnovane na analizi slike su indirektne.
- *Aktivne/pasivne.* Metode kod kojih postoji kontrolisani izvor svetlosti (laser, strukturno svetlo, infracrvena svetlost) su aktivne, a pasivne su zasnovane na primeni prirodnog (nekontrolisanog) izvora svetlosti.
- *Monokularne/binokularne.* Metode merenja rastojanja iz jedne tačke su monokularne. Na taj način kao rezultat uvek se dobija dvodimenzionalna slika, a trodimenzionalna se može dobiti skeniranjem. Binokularne metode temelje se na posmatranje scene iz dve (ili više tačaka), tako da se kao rezultat dobija trodimenzionalna (reljefna) slika.

Konkretna metoda uvek ima po jednu osobinu iz svake od tri navedene grupe, pa ukupno postoji 2^3 različitih metoda. Na primer, prosta triangulacija jeste pasivna, direktna i monokularna metoda. Sve kombinacije nemaju podjednak značaj za realizaciju 3D-vizisenzora u robotici i zato će se ovde razmotriti samo najkarakterističnije.

6.5.2. 3D-vizisenzor sa fokusiranjem slike

Metoda na kojoj se zasniva rad senzora sa automatskim fokusiranjem slike je *direktna, pasivna* i *monokularna*. Primenjuje se od samog početka robotike.

Izoštavanje je pomeranje objektiva radi formiranja slike određenih dimenzija na definisanom rastojanju od zadnje površine objektiva. Kada je poznata žižna daljina sočiva f , tada se rastojanje $r=z$ između centra sočiva i tačke O na objektu računa iz poznate jednačine:

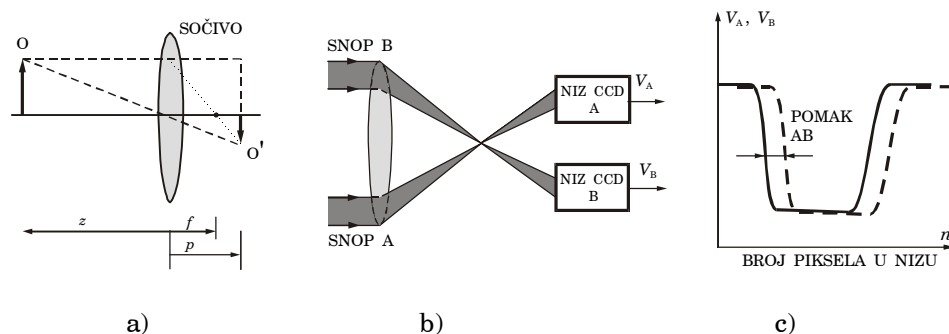
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{z} + \frac{1}{p} \quad \Rightarrow \quad z = \frac{pf}{p - f}, \quad (6.44)$$

gde je p rastojanje između slike O' i sočiva (slika 6.25.a). Sve izoštrene (fokusirane) tačke na datoj slici pripadaju tačkama scene jednako udaljenim od sočiva.

TCL kamere. Danas se najčešće upotrebljavaju refleksne kamere sa jednim objektivom. Za ove kamere karakteristično je da svetlost dolazi kroz objektiv na optički delitelj, pri čemu jedan deo svetlosti prolazi na senzorsku matricu gde se formira slika, a drugi deo propušta se na sistem za izoštravanje. Ovo je poznato kao TCL princip (*Through Camera Lens*). Oštrina slike podešava se fokusiranjem – pomeranjem objektiva sve dok se ne dobije oštra slika.

TCL senzor pravi se na različite načine. Konstrukcija sa dva niza od n CCD detektora razvijena je za potrebe robotike (slika 6.25.b). Na svaki niz pada odgovarajući deo svetlosti sa objekta (snop A ili snop B). Izlaz niza A podudaran je sa izlazom niza B ($V_A=V_B$) kada je slika u fokusu. Ako postoji pomak između izlaza ($V_A \neq V_B$), objektiv se automatski pomera pomoću servomehanizma sve dok pomak ne iščezne, tj. sve dok se slika ne fokusira.

Mehanizam za automatsko pomeranje objektiva relativno je glomazan i spor za primene u robotici. Za ove namene pogodnija je modifikacija TCL metode sa fiksiranim objektivom. Pomak AB proporcionalan je udaljenosti od mesta gde je slika optimalno izoštrena. Koeficijent proporcionalnosti utvrđuje se kalibracijom, a dobijene vrednosti zapisuju u memoriji u obliku tabele. Kada manipulator sa kamerom čiji je objektiv fiksiran prilazi radnom predmetu, tada se, zavisno od udaljenosti predmeta, javlja pomak AB . Pomak je jednak nuli kada je slika u fokusu, negativan je kada je slika izvan fokusa ($p > f$), odnosno pozitivan je kada je slika unutar fokusa ($p < f$). Za ilustraciju postupka na slici 6.25.c prikazan je dijagram odziva dvostrukog CCD niza za crni predmet na beloj podlozi. Rezolucija određivanja udaljenosti radnih predmeta je $\pm 0,03$ cm pri udaljenosti od 10 cm, odnosno ± 3 cm pri udaljenosti od 100 cm.



Slika 6.25. TCL kamera: a) sočivo, b) TCL senzor izoštrnosti slike sa dva niza detektora, c) AB pomak za tamni predmet na svetloj podlozi

6.5.3. 3D-vizisenzori sa strukturnim svetlom

Metoda na kojoj se zasniva rad ovih senzora je *indirektna*, *aktivna* i *monokularna*, a prema načinu merenja udaljenosti često se naziva i *triangulaciona*.

Triangulacija je merenje rastojanja na osnovu tri tačke koje čine vrhove trougla. Tačka O pripada objektu, a tačke T_1 i T_2 su fiksne triangulacione tačke – pozicije izvora svetlosti i kamere (slika 6.26.a). Poznato je rastojanje d između T_1 i T_2 , te uglovi θ_1 i θ_2 . Pomoćna veličina h_2 može se izračunati na dva načina:

$$h_2 = z_1 \sin[180^\circ - (\theta_1 - \theta_2)] \quad (6.45)$$

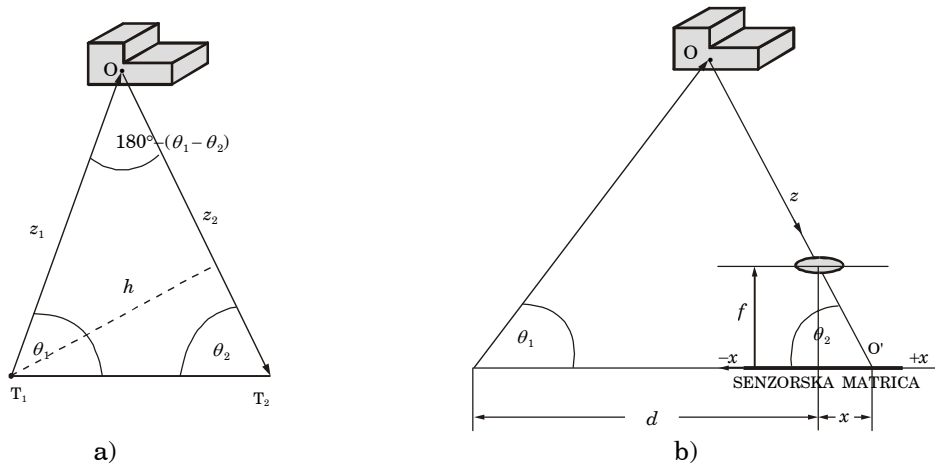
$$h_2 = d \cdot \sin \theta_2, \quad (6.46)$$

odakle se izjednačavanjem desnih strana lako dobija nepoznato rastojanje između tačaka T_1 i O :

$$z_1 = \frac{d \sin \theta_2}{\sin[180^\circ - (\theta_1 + \theta_2)]}. \quad (6.47)$$

Na sličan način određuje se i rastojanje između druge triangulacione tačke i objekta:

$$z_2 = \frac{d \sin \theta_1}{\sin[180^\circ - (\theta_1 + \theta_2)]}. \quad (6.48)$$



Slika 6.26. Triangulacija: a) pasivna, b) aktivna

Aktivna triangulacija podrazumeva kretanje izvora svetlosti ili kamere. Obično je kamera fiksirana na rastojanju d od lasera kao izvora svetlosti (slika 6.26.b). Iz geometrijskih odnosa za trougao što ga čine izvor, objekat i kamera može se odrediti rastojanje z . Osvetljena tačka na objektu O imaće svoju sliku na senzorskoj matrici kamere – tačku O' na rastojanju $+x$ od centra matrice (ose kamere). Vrednost x lako se određuje iz karakteristika matrice, pri čemu je x pozitivno kada je objekat na levoj strani u odnosu na ose kamere, a negativno kada je objekat na desnoj strani. Ugao θ_2 pod kojim se vidi objekat određuje se jednostavno:

$$\operatorname{tg} \theta_2 = \frac{f}{x}, \quad (6.49)$$

odnosno, primenom opšte triangulacione jednačine (6.48), traženo rastojanje između kamere i objekta $z=z_2=OO'$ računa se na sledeći način:

$$z = \frac{(d+x) \cdot \sin \theta_1}{\sin[180^\circ - (\theta_1 + \theta_2)]}. \quad (6.50)$$

Opisani način rada odgovara ugaonoj poziciji lasera θ_1 . Kada se laserski snop brzo zakreće u jednoj ravni ili propusti kroz cilindrično sočivo, dobija se ravanski snop svetlosti koji pada na objekat. Umesto tačkaste slike nastaje slika u obliku linije koja prati površinu (strukturu) objekta. Zato se ovakvo svetlo naziva strukturalno svetlo. Na mestima gde je objekat u seni, linija slike ima prekid. Pomeranjem strukturalnog svetla normalno na njegovu ravan, dobija se niz linijskih slika koje odgovaraju reljefu objekta.

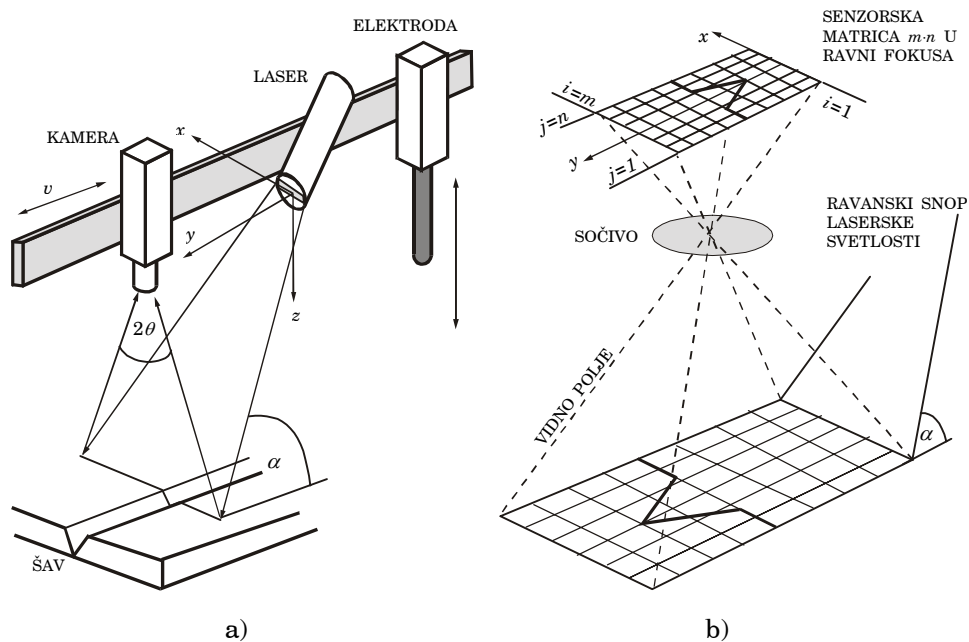
Triangulacija i strukturalno svetlo u automatskom zavarivanju. Kombinacija kamere i lasera sa ravanskim snopom svetlosti ima veliku primenu u automatskom zavarivanju i lepljenju. Za robotizovani zavarivač na slici 6.27.a poznati su: horizontalno rastojanje d između centara sočiva lasera i kamere, vidno polje kamere 2θ i ugao α između ravni laserskog snopa i horizontalne ravni. Pomoću programa za analizu slike dolazi se do podataka neophodnih za servonavođenje manipulatora i proračun količine materijala za popunu spoja. Početna etapa je pridruživanje stvarnih koordinata x, y, z pikselima i, j ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$). Slika od $m \times n$ piksela je orijentisana: osnovi slike (vrsta $i=1$) odgovaraju tačke najbliže laseru, a vrhu slike ($i=m$) odgovaraju tačke koje su najviše udaljene od lasera (slika 6.27.b). Položaj piksela u i -tom redu između osnove i vrha slike ($1 \leq i \leq m$) može se predstaviti u relativnom obliku: $r=i/m$.

Koordinatni početak geometrijskih koordinata x, y, z postavljen je u centru sočiva lasera. Na osnovu geometrijskih odnosa, vrednost koordinate z (dubina tačke na spojnom šavu) računa se tringulacionim postupkom na sledeći način:

$$z = \frac{l}{\operatorname{ctg} \alpha + (1-2r) \cdot \operatorname{tg} \theta}. \quad (6.51)$$

Pošto je $0 < r < 1$, proizilazi da je dubina tačke unutar definisanih granica:

$$\frac{l}{\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{tg}\theta} \leq z \leq \frac{l}{\operatorname{ctg}\alpha - \operatorname{tg}\theta}. \quad (6.52)$$



Slika 6.27. Primena senzora vizije sa strukturnim svetlom u zavarivanju: a) robotizovani zavarivač, b) piksel u ravni fokusa kamere i pridruživanje koordinate z

Koordinata y spaja koordinatni početak i centar leće kamere, usmerena je duž šava u pravcu kretanja elektrode i prolazi kroz sredinu senzorske matrice. Njena vrednost za posmatranu tačku na šavu računa se jednostavno:

$$y = \frac{z}{\operatorname{tg}\alpha}. \quad (6.53)$$

Koordinata x usmerena je poprečno na šav. Njena vrednost izražena je kao relativna udaljenost j -tog reda od sredine senzorske matrice:

$$x = \frac{j - \frac{n}{2}}{\frac{n}{2}} \cdot z \cdot \operatorname{tg}\theta = (j - k) \cdot F_1, \quad (6.54)$$

gde su $k=n/2$ i $F_i=(2z/n)\cdot\text{tg}\theta$.

Proračun aktuelnih koordinata pomoću jednačina (6.51), (6.53) i (6.54) pojednostavljuje se i ubrzava formiranjem tabele iz koje se na osnovu očitane vrste $r=i/m$ direktno dobijaju y i z . Za koordinatu x prvo se u tabeli nađe odgovarajuće F_i , koje se onda pomnoži sa razlikom $j-k$, gde je j očitana kolona za dati piksel.

Nakon što je uspostavljena korespondencija između slike na senzoru vizije i dimenzija šava, poseban program realizuje servonavodjenje elektrode održavajući sliku šava na referentnom položaju, tj. u sredini vidnog polja. Program koji određuje količinu materijala potrebnog za popunjavanje šava pamti dve sukcesivne slike šava. Kada je promena dimenzija šava velika, potrebno je češće uzorkovanje i brže procesiranje. Količina materijala je:

$$V_k = l \cdot \sin \alpha \cdot \frac{A_k - A_{k-1}}{2}, \quad (6.55)$$

gde su A_k i A_{k-1} površine poprečnog preseka šava određene u trenucima t_k i t_{k-1} , a l rastojanje između ovih preseka duž ose y . Manipulator nosi kameru, laser i elektrodu i kreće se brzinom v [m/s]. Potrošnja materijala elektrode je

$$F = \frac{V_i \cdot v}{l} \left[\text{m}^3/\text{s} \right]. \quad (6.56)$$

Na osnovu ovih podataka vanjski kontroler na vreme signalizira automtsku zamenu istrošene elektrode.

6.5.4. 3D-vizisenzori na bazi laserskog daljinara

Metoda na kojoj se zasniva rad ovih senzora je *direktna*, *aktivna* i *monokularna*, a prema načinu merenja udaljenosti može biti triangulaciona, fazna ili vremenska.

Detekcija 3D-oblika predmeta skeniranjem pomoću laserskog zraka svodi se na određivanje udaljenosti između lasera i objekta. Najčešće se primenjuju metode triangulacije, merenje razlike faze svetlosti na putu od lasera do objekta i nazad do prijemnika ili merenja vremena na tom putu.

Dimenzije laserskih daljinara (*range-finder*) slične su minijaturnim kamerama zavaljujući malim dimenzijama laserskih dioda, poluprovodničkih detektora pozicije laserskog zraka, mikromotora za pokretanje skenera i jednostavnom povezivanju sa

računarom radi obrade signala. Tipični merni opseg je 0,1–1 m, a ređe do 10 m.

Metode triangulacije kod laserskih daljinara imaju izvesne specifičnosti u odnosu na opšti princip triangulacije. Razlikuje se prosta, sinhronizovana i dvoosna triangulaciju.

Prosta triangulacija je geometrijska metoda određivanja rastojanja kod kojeg rotira samo izvor laserske svetlosti, tj. projekcioni skener (slika 6.28.a). Laserski zrak iz izvora u tački $I(d,0)$ projektuje se prvo na referentnu tačku $R(d/2,l)$ pod uglom θ_0 , reflektuje se kroz sočivo žižne daljine f i fokusira u tački $P_0[x_0, z_0]$.

Kordinata z_0 , tj. udaljenost lika od ose x računa se iz jednačine sočiva (6.44):

$$z_0 = -\frac{fl}{l-f}. \quad (6.57)$$

Koordinata x_0 , tj. udaljenost od ose z takođe ima negativnu vrednost, a računa se iz jednačine za veličinu lika:

$$x_0 = -\frac{d}{2} \cdot \frac{p}{l} = -\frac{d}{2} \cdot \frac{f}{l-f}. \quad (6.58)$$

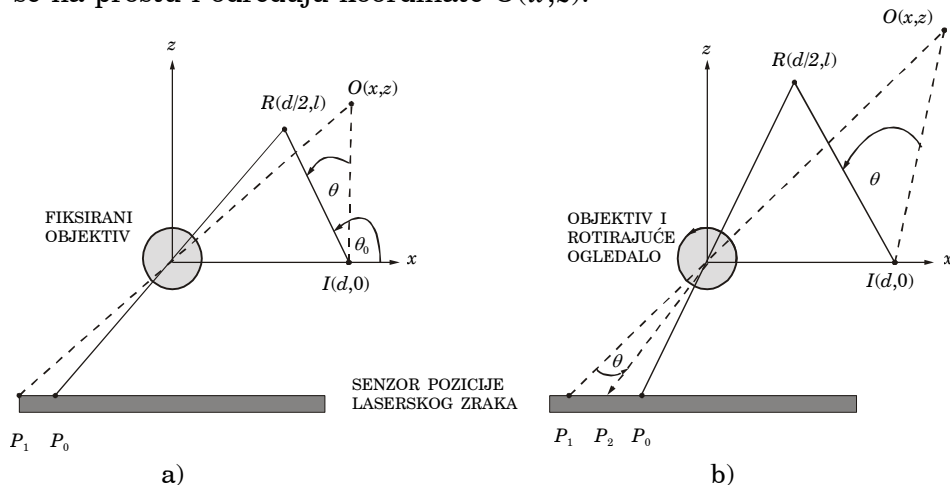
Zbog rotacije projekcionog skenera, nakon pomeranja za negativni ugao $-\theta$, laserski zrak projektuje se na tačku objekta $O(x,z)$ pod uglom $\theta_0 - (-\theta)$ i detektuje u tački $P_1[-x_1, -fl/(l-f)]$. Vrednosti d, l, f određene su konstrukcijom, vrednosti ugaone pozicije θ mere se odgovarajućim sensorom ugaonog pomeraja, a vrednost $-x_1$ meri se sensorom pozicije laserskog zraka. Na osnovu dobijenih podataka i trigonometrijskih relacija računaju se koordinate tačaka objekta $O(x,z)$:

$$x = dx_1 \left[x_1 + \frac{fl(d + 2l \cdot \operatorname{tg}\theta)}{(l-f) \cdot (d \cdot \operatorname{tg}\alpha)} \right] \quad (6.59)$$

$$z = -d \left[\frac{x_1(l-f)}{fl} + \frac{2l \cdot \operatorname{tg}\theta + d}{d \cdot \operatorname{tg}\theta - 2l} \right]^{-1}. \quad (6.60)$$

Sinhronizovana triangulacija je geometrijska metoda određivanja rastojanja u kojem projekcioni skener (izvor laserske svetlosti) i detekcioni skener (objektiv sa reflektujućim ogledalom) rotiraju sinhrono (slika 6.28.b). Zbog rotacije detekcionog skenera,

laserski zrak reflektovan od objekta $O(x,z)$ zakreće u koordinatnom početku za ugao θ i detektuje se u tački $P_2[-x_2, -fl/(l-f)]$, pri čemu je $x_2 < x_1$. Na osnovu geometrijskih odnosa može se izračunati x_1 ako je poznato (izmereno) x_2 , odnosno sinhronizovana triangulacija svodi se na prostu i određuju koordinate $O(x,z)$.



Slika 6.28. Triangulacija: a) prosta, b) sinhronizovana

Dvoosna triangulacija je geometrijsko određivanje rastojanja pri sinhronom skeniranju u vertikalnoj i horizontalnoj ravni. To se postiže tako što je, slično kao kod sinhronne triangulacije postignuta sinhronizacija rotacije ose projekcije sa rotacijom ose detekcije, a rotacija dodatnog ogledala odvija se nekom drugom ugaonom brzinom oko ose koja je paralelna osi x i na visini $z=h$. Tačke objekta računaju se pomoću odgovarajućih trigonometrijskih formula.

Senzor pozicije laserskog zraka. Za ove namene primenjuju se CCD senzori, planarne fotodiode PSD (*Position-Sensitive Diodes*) i dvostruke fotodiode. CCD niz omogućava visoku rezoluciju merenja pozicije laserskog zraka – do jedne polovine piksela, pri čemu je CCD piksel 0,01–0,1 mm.

Kada se niz CCD elemenata primenjuje kao detektor pomeraja, veliki problem je što izlazni signal nije proporcionalan poziciji, već je tu informaciju potrebno izdvojiti posebnim kolima. Frekventna propusnost je do 40 kHz.

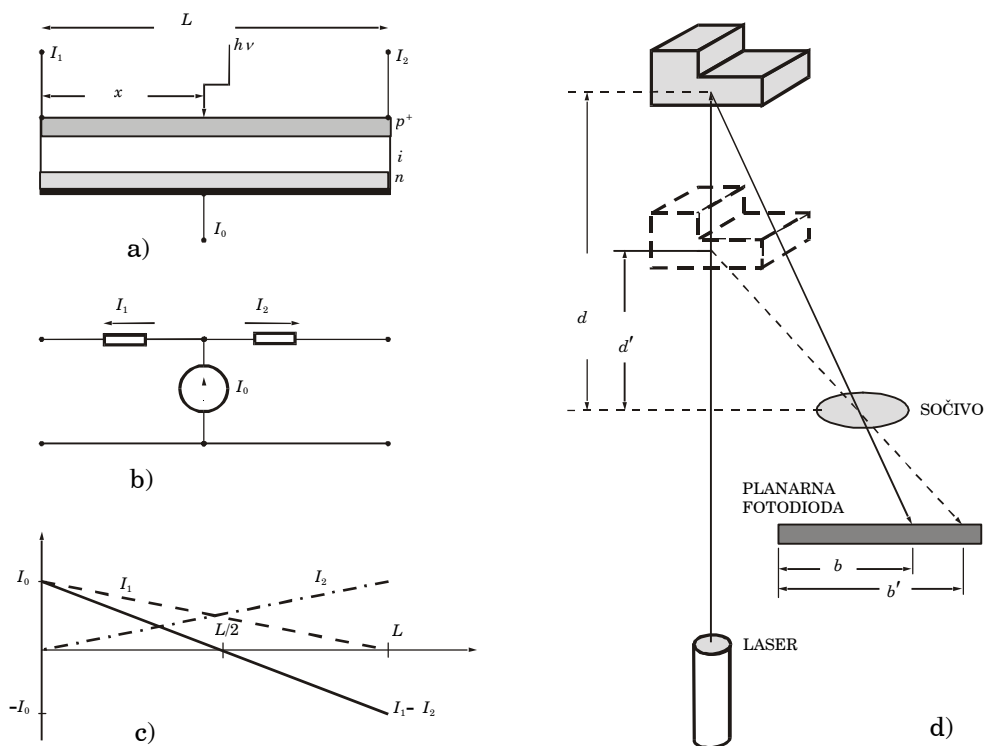
Kada na planarnu fotodiodu (fotoelement) padne laserski zrak, javlja se struja I_0 kroz fotodiodu koja se na otporničkom sloju deli na

struje I_1 i I_2 , čiji odnos zavisi od mesta gde je zrak pao (slika 6.29.a). Ovaj efekat može da posluži za merenje i translacionog i rotacionog pomeraja.

Ukupna struja I_0 proporcionalna je intenzitetu upadne svetlosti. Zato će laserski skener sa izlaznim signalom

$$I_0 = I_1 + I_2, \quad (6.61)$$

generisati generisati ravansku sliku, tj. projekciju 3D-objekta – slično kao standardna CCD kamera. Drugim rečima, amplituda izlaznog signala ne zavisi od geometrijskih karakteristika objekta, već od refleksije svetlosti sa njegove površine.



Slika 6.29. Analogni senzor pozicije laserskog zraka: a) princip rada, b) ekvivalentna šema, c) statičke karakteristike d) detekcija pozicije laserskog zraka pri promeni rastojanja objekta

Razlika struja $I_1 - I_2$ zavisi od pozicije na PSD elementu na kojoj se detektuje reflektovani laserski zrak sa objekta. Prema tome, izlazni signal u obliku

$$\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \frac{I_1 - I_2}{I_0} \quad (6.62)$$

odnosi se na geometrijske karakteristike objekta. Kada se laserski zrak premešta s jedna na drugu stranu, amplituda izlaznog signala $I_1 - I_2$ menja se kao reljef objekta duž linije premeštanja (skeniranja). Sličan rezultat dobija se kada je izlazni signal I_1 ili I_2 , ali je tada statička karakteristika uvek istog znaka i manjeg nagiba (manja osetljivost). Frekventna propusnost jednog PSD elementa je oko 1 MHz.

Dve obične fotodiode kada su jedna pored druge, slično kao planarna fotodiode, imaju odnos struja $(I_1 - I_2)/(I_1 + I_2)$ proporcionalan poziciji laserskog zraka. Frekventna propusnost je preko 30 MHz.

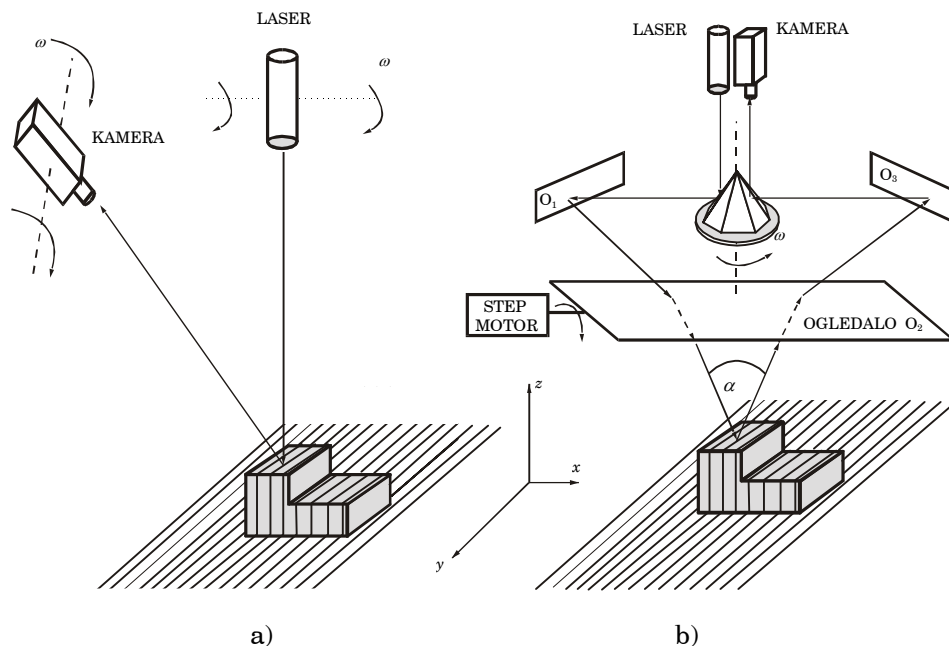
3D-vizisenzor sa sinhronizovanom triangulacijom.

Najprostiji sistem 3D-vizije sastoji se od dve kamere kojima se snima ista scena iz dva različita ugla (θ_1 i θ_2), tako da se dobijaju dve slike (stereovizija). Tačka (x, y, z) detektuje se na senzorskoj matrici prve kamere kao (x_1, y_1) , a na senzorskoj matrici druge kamere kao (x_2, y_2) . Na osnovu poznatih podataka dobijenih kalibracijom i očitanih vrednosti (x_1, y_1) i (x_2, y_2) računaju se koordinate tačke objekta (x, y, z) . Opisani sistemi pogodni su za kontrolu kvaliteta proizvoda na pokretnoj traci. Greške u utvrđivanju korespondencije tačaka (x_1, y_1) i (x_2, y_2) osnovni su nedostaci ovih jednostavnih sistema.

3D-vizisenzor sa sinhronizovanom triangulacijom složeniji je od prethodnog. U starijim verzijama ovih uređaja rotacija ose projekcije i rotacija ose detekcije ostvaruje se pomoću dva nezavisna mehanizma (slika 6.30.a). Tehnički problemi u vezi sa regulacijom sinhronne rotacije oba mehanizma glavna su prepreka većoj upotrebi ovog tipa 3D-vizisenzora.

Sistem sa tzv. autosinhronizacijom znatno je prostiji zahvaljujući piramidalnom ogledalu kod kojeg jedna strana služi za projektovanje laserskog zraka, a suprotna za detekciju (slika 6.30.b). Piramida rotira konstantnom ugaonom brzinom w . Laserski zrak iz izvora reflektuje se sa piramide na fiksirano ogledalo O_1 , zatim na rotirajuće ogledalo O_2 i preko fiksiranog ogledala O_3 do senzora pozicije. Referentna tačka podešava se ugaonim položajima u kojima su fiksirani O_1 i O_3 , skeniranje duž ose x ostvaruje se rotacijom piramidalnog ogledala kontinualnom ugaonom brzinom $w=60-1800$ rad/s, a skeniranje duž ose y pomeranjem ogledala O_2 u

fiksni koracima pomoću step motora. Kao rezultat dobija se reljefna slika scene sastavljena od linija koje idu po površini predmeta. Gustina linija (rezolucija) biće veća kada je korak sa kojim se pomera ogledalo O_2 manji.



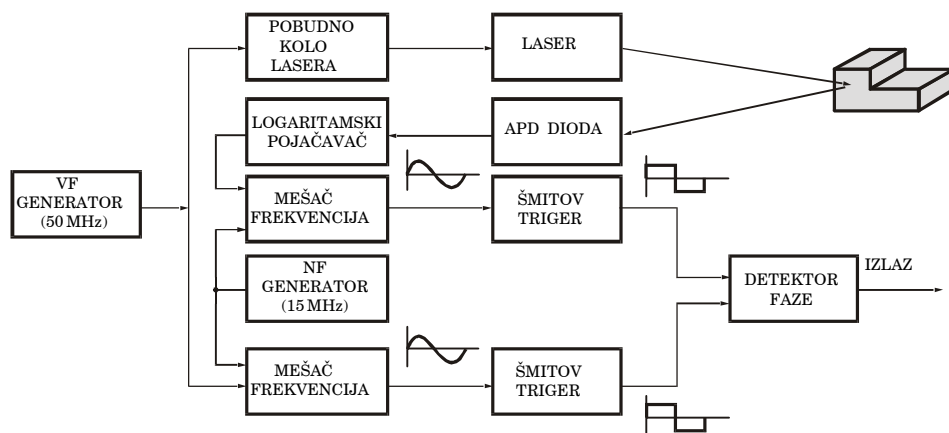
Slika 6.30. 3D-vizisenzor sa laserskim daljinarom: a) sinhronizovano skeniranje b) autosinhronizovano skeniranje

Ugao α između ose projekcije i ose detekcije je $10\text{--}30^\circ$. Pri manjem ugaonom razdvajanju osa optički sistem je kompaktniji, ali se često dešava da delovi objekta ostaju u seni, bilo što projekcioni zrak ne dopire do tih delova ili reflektovani zrak ne dopire do senzora pozicije. Kod većeg ugla razdvajanja osa retko se javljaju sene, ali su zato optički elementi i čitav uređaj znatno veći.

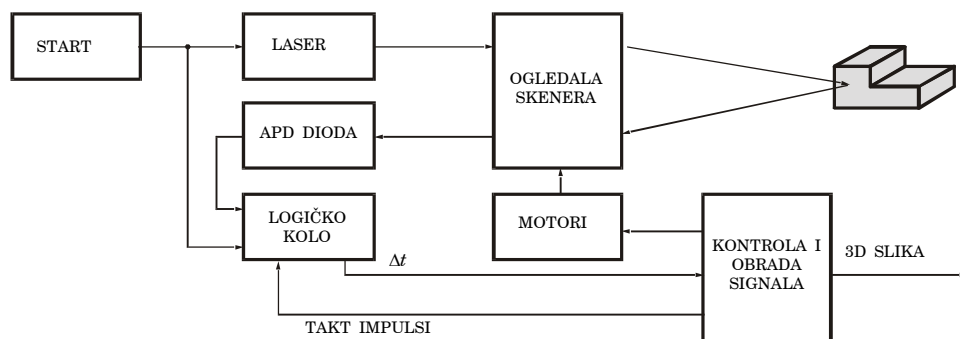
3D-vizisenzor sa laserskim daljinarom na principu merenja fazne razlike. Ovaj 3D-skener ima lasersku diodu od dvostruke heterostrukture GaAlAs koja emituje IC svetlost ($0,8\ \mu\text{m}$) manje snage (15 mW). Laserski zrak projektuje se na površinu objekta u obliku tačke i rasipa se u okolinu. Ova difuzna svetlost detektuje se pomoću APD diode koja je smeštena tako da je osetljiva na svetlost u koaksijalnom pravcu sa osom projekcije (slika 6.31.a).

Udaljenost od skenera do predmeta meri se na osnovu razlike u fazi između emitovane i primljene svetlosti. Laser emituje pakete

impulsa ili kontinualni svetlosni signal sinusnog oblika visoke frekvencije (50 MHz). Kod impulsnog načina rada vreme trajanja jednog impulsa je oko $0,5 \mu\text{s}$. Na rastojanju od 3 m vreme putovanja svetlosti je $0,2 \mu\text{s}$, što je samerljivo sa dužinom trajanja impulsa. Zbog toga se teško ostvaruje sinhronizacija predajnika i prijmnika za mala rastojanja, pa se češće primenjuje kontinualna tehnika – na radnu struju lasera (150 mA) superponira se naizmenična struja (10 mA) iz visokofrekventnog generatora (50 MHz).



a)



b)

Slika 6.31. 3D-vizisenzor: a) merenje faze, b) merenje vremena

Kada se scena skenira modulisanom laserskom svetlošću, potreban je složen uređaj za izdvajanje informacije o reljefu iz razlike u fazi između emitovane i referentne svetlosti. Referentni signal u_r dobija se u mešaču frekvencija tako što se visokofrekventni signal moduliše se znatno nižom frekvencijom od 15 kHz. Prijemni (merni) signal prvo prolazi kroz logaritamski pojačavač da bi se komprimirao

njegov veliki dinamički opseg, a potom se takođe moduliše sa 15 kHz. Razlika faza između niskofrekventnih signala u_m i u_r ista je kao kod izvornog signala na putu laser–objekat–prijemnik, ali je detekcija razlike faza mnogo lakša na nižoj frekvenciji od 15 kHz. Rezolucija očitavanja faze je oko $0,2^\circ$, što odgovara rezoluciji očitavanja reljefa scene od 1,5 mm na mernom području od 200 mm do 400 mm.

3D-vizisenor sa laserskim daljinarom na principu merenja vremena putovanja svetlosti od lasera do objekta i nazad do prijemnika (TOF metoda). Referentni impuls za start lasera istovremeno aktivira laser i brojač takt impulsa u logičkom kolu, a reflektovani signal sa objekta detektovan APD diodom zaustavlja brojač. Ukupan broj takt impulsa proporcionalan je vremenu $\Delta t = 2z/c$, gde je z udaljenost trenutno skenirane tačke objekta, a c brzina svetlosti (slika 6.31.b).

3D-vizisenor sa autofokusiranjem. Kada se meri visina predmeta z_{it} triangulacionom metodom, tada se detektuje pomeranje projekcije pozicije laserskog zraka na objektu duž ose z tako da se z_{it} pretvara u komponentu l_{it} :

$$l_{it} = z_{it} \cdot \cos \theta, \quad (6.63)$$

pri čemu je θ ugao između ose detektora pozicije laserskog zraka i radne ploče, a l_{it} normalno rastojanje od tačke projekcije na objektu do ose detektora. Iz jednačine (6.63) proizilazi da se visina objekta uvek detektuje sa redukovanjem razmere $l_{it} < z_{it}$ (slika 6.32.a).

Radi povećavanja tačnosti merenja visine, primenjuje se metoda intersekcije, koja je u izvesnom suprotna triangulaciji: visina objekta z_{ii} konvertuje se u pomeranje l_{ii} projekcije laserskog zraka duž ose x :

$$l_{ii} = \frac{z_{ii}}{\operatorname{tg} \theta}, \quad (6.64)$$

odakle proizilazi da je za $\theta < \pi/4$ merenje visine uvek praćeno sa uvećanom razmerom: $l_{ii} > z_{ii}$ (slika 6.32.b).

Povećanje razmere pri intersekcijском merenju visine tačke z_{ii} može dobro da se iskoristi za detekciju greške pri servonavodnju vertikalne z -ploče, (slika 6.32.c). Na slici su upotrebljene dve laserske diode (15 mW, $\lambda = 0,78 \mu\text{m}$) da bi se popravio odnos S/N detektora pozicije laserskog zraka, koji se projektuje kao tačka $10 \times 20 \mu\text{m}$.

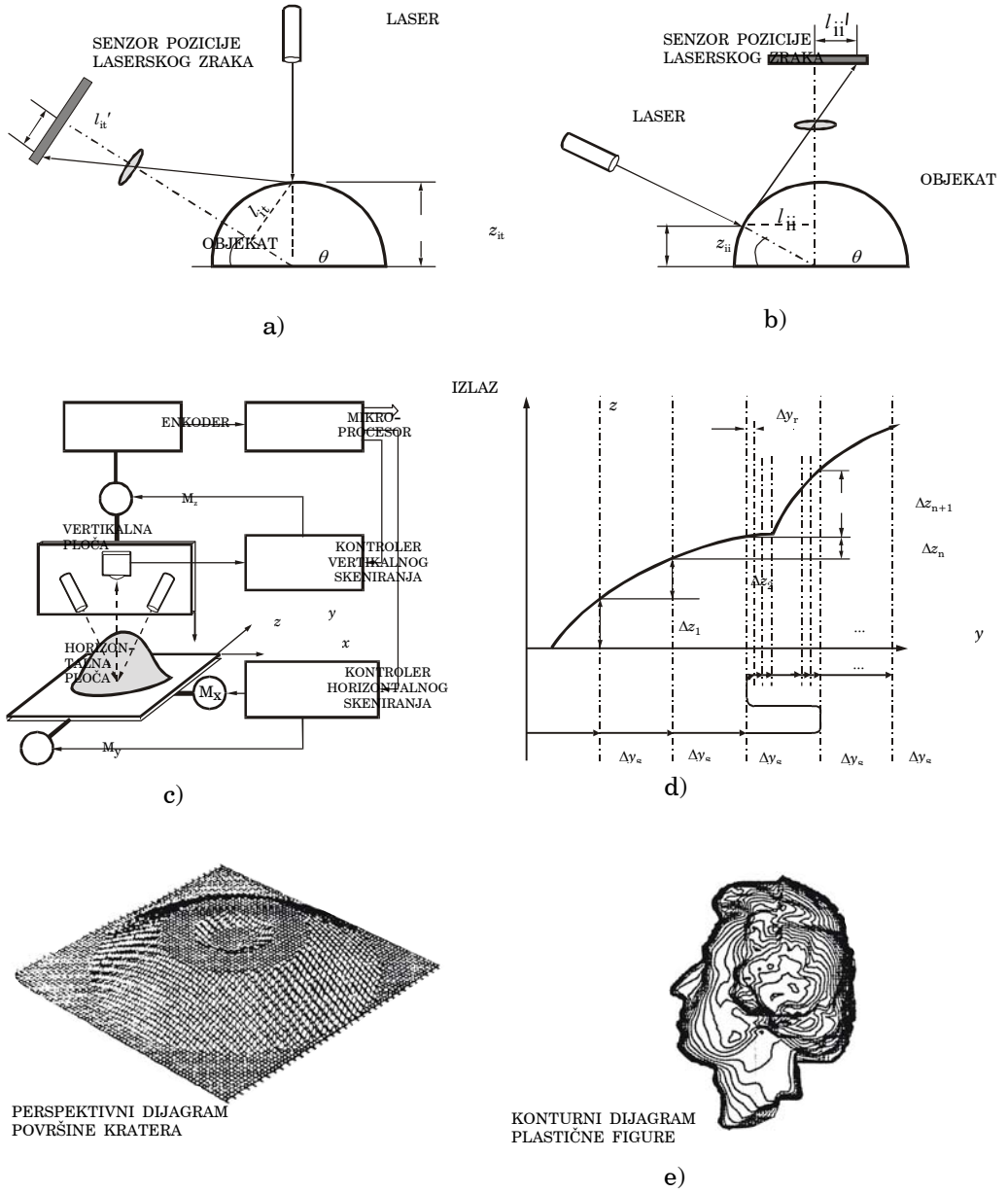
Laserski zraci projektuju se simetrično na radni objekat pod uglom $\theta=30^\circ$ u odnosu na horizontalnu ploču, čime se dobija faktor uvećanja razmere od 1,73. Ispred detektora pozicije (planarne fotodiode) je objektiv sa uvećanjem 1,8, pa je ukupno uvećanje $1,73 \cdot 1,8=3,1$. Laseri i detektor pozicije pomeraju se zajedno sa z -pločom. Pomeranje je pod kontrolom pozicione servoregulacione konture, koja održava konstantno rastojanje između detektora i tačke projekcije laserskih zraka na objektu tako da slika te tačke bude uvek u centru detektora. Pozicioni servosistem sastoji se od kontrolera koji upravlja konturom, jednosmernog servomotora za pozicioniranje i enkodera za merenje položaja osovine servomotora. Tehnički podaci opisanog sistema 3D-vizije su:

- z -ploča: opseg pomeranja 50 mm, maksimalna brzina 50 mm/s, rezolucija 2 μm po impulsu;
- xy -ploča: opseg pomeranja u smeru ose x 100 mm (u smeru ose y 200 mm), maksimalna brzina pomeranja ploče 25 mm/s, rezolucija 0,5 μm po impulsu.

Svi današnji sistemi optičke 3D-vizije relativno su spori. Postoje različite strategije skeniranja i komplikovani programi za povećanje tačnosti i brzine merenja. Strategija zumiranja (autofokusiranja) proizišla je iz prethodno opisanog postupka intersekcije. Za realizaciju zumiranja potrebne su dve brzine automatskog skeniranja – standardna i redukovana (slika 6.32.d). Skeniranje počinje standardnim korakom $\Delta y_s=0,5$ mm da bi se odredio pomak z -ploče, odnosno visina z_i . Na svakom koraku u računaru se formira prirast visine drugog reda:

$$\Delta^2 z_i = \Delta z_i - \Delta z_{i-1}, \quad (6.65)$$

pri čemu je $\Delta z_i = z_i - z_{i-1}$, nakon čega se taj prirast poredi sa definisanom referentnom vrednošću r_f .



Slika 6.32. Skener 3D-oblika: a) na principu triangulacije, b) na principu intersekcije, c) struktura skenera, d) princip zumiranja, e) primeri skeniranih objekata

Kada je

$$\left| \Delta^2 z_i - r_f \right| < \varepsilon, \tag{6.66}$$

gde je ε broj kojim se određuje tačnost poređenja, tada se izmerena vrednost z_i zapisuje u memoriji i ide na sledeći korak uzorkovanja $\Delta y_s = 0,5$ mm. Kada je, međutim, razmatrani diferencijalni prirast drugog reda veći od r_f , odnosno $|\Delta^2 z_i - r_f| \geq \varepsilon$, tada kontroler daje komandu step motoru M_y da se vrati za jedan standardni korak Δy_s i da onda ponovo krene u skeniranje sa redukovanom brzinom deset puta manjom od standardne: $\Delta y_r = 0,1 \Delta y_s = 0,05$ mm. Slično kao i pri normalnoj brzini, tada se formiraju diferencijalni prirasti drugog reda $\Delta^2 z_{ri} = \Delta z_{ri} - \Delta z_{r-1}$. Kada je $|\Delta^2 z_{ri} - r_{rf}| < \varepsilon$, tekuća vrednost z_r pamti se u memoriji i ide na sledeći korak Δy_r . Kada se ustanovi da je $|\Delta^2 z_{ri} - r_{rf}| \geq 0$, tada tekuća vrednost visine z_{ri} predstavlja tačku infleksije koja se posebno registruje u memoriji. Postupak skeniranja sa redukovanom brzinom nastavlja se sve dok se ne prođe i deseti korak Δy_r , kada se opet nastavlja sa normalnom brzinom skeniranja na opisani način.

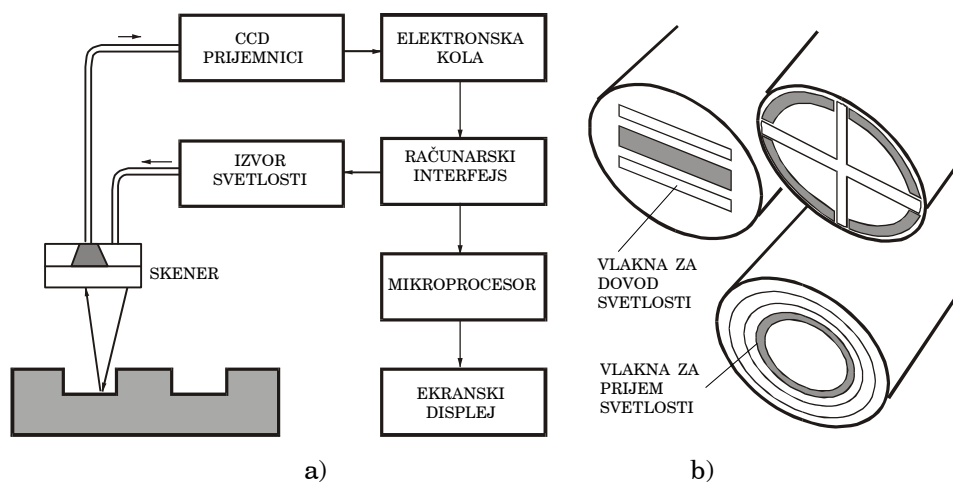
Detekcija zumiranjem omogućava tačnost merenja visine $\pm 4 \mu\text{m}$ sa obradom oko 30 tačaka u sekundi na PC računaru srednje brzine. Merenje 3D-oblika primenjuje se u automatskoj proizvodnji i kontroli predmeta napravljenih od metala, keramike ili plastike. Kao rezultat merenja dobija se slika na kojoj je premet prikazan pomoću perspektivnog ili konturnog dijagrama (slika 6.32.e).

6.6. SPECIJALNI SENZORI VIZIJE

6.6.1. Senzori vizije sa optičkim vlaknima

Optoelektronski skener sastoji se od snopa optičkih vlakana, pri čemu se jednim vlaknima dovodi svetlost od izvora do radnog prostora, a drugim vlaknima provodi se reflektovana svetlost od objekata u radnom prostoru do optičkih prijemnika (slika 6.33.a). Raspored optičkih vlakana na skeneru prilagođen je slici koja se skenira i obliku (formatu) matrice, što je svojevrsna primarna obrada signala. Linearni raspored vlakana služi za brzo skeniranje pravougaonih objekata, unakrsni je pogodan za detekciju centra, a koncentrični za dobijanje informacije o ugaonim zakretanjima (slika

6.33.b). Skener i optička vlakna su laganiji u poređenju sa minijaturnim kamerama, skener je prostorno odvojen od elektronskih kola za obradu signala i može lako da se ugradi na prste robota, a optički kabl pruža odličnu zaštitu od elektromagnetskih smetnji.



Slika 6.33. Optoelektronski skener: a) raspored optičkih vlakana na osetilnoj površini skenera, b) strukturna blok-šema

Optički kabl dugačak je oko 1 m, različitog oblika i veličine poprečnog preseka. Najčešće se sastoji od monomodnih optičkih vlakana prečnika 10 μm . Na senzorskom kraju kabl ima ugrađeno sočivo sa žižnom daljinom koja zavisi od vidnog polja i prostorne rezolucije. Na drugom kraju vlakna su direktno spojena sa optičkim prijemnicima ili takođe imaju mikrosočivo za fokusiranje reflektovane svetlosti na optički prijemnik. Kao prijemnici najpogodniji su CCD elementi osetljivi na vidljivu ili infracrvenu svetlost.

Obrada slike počinje tzv. komprimiranjem podataka. Naime, pri svakom skeniranju registruju se i šalju na obradu samo one pozicije gde je došlo do promene skale sivog u odnosu na prethodno skeniranje. Akvizicija podataka je kontinualna, pa su neophodne bar dve međumemorije. Dok se komprimirani podaci iz tekućeg skeniranja pune u jednu memoriju, mikroprocesor obrađuje podatke prethodnog skeniranja smeštene u drugoj memoriji. U narednom ciklusu memorije zamenjuju uloge bez prekida u obradi. Poseban tip obrade je dinamičko grupisanje određenih sektora CCD matrice i

formiranje odgovarajućih slika, čime se postiže sličnost sa istovremenim snimanjem sa više kamera.

Primena optoelektronskog skenera. Hrapavost je važan parametar u kontroli proizvoda. Klasični senzori za merenje hrapavosti imaju iglu koja prati neravnine materijala u opsegu 0,1–1 mm. Kapacitivni senzor detektuje pomeranje igle sa rezolucijom od 0,01 μm . Nedostaci senzora sa iglom su ograničenost rezolucije dimenzijama vrha igle, mali opseg, niska efikasnost i mogućnost oštećenja merene površine.

Automatizovano on-line merenje hrapavosti zasniva se na adaptaciji beskontaktnih metoda merenja rastojanja pomoću optoelektronskog skenera. U unutrašnjem krugu prečnika D_1 smeštena su optička vlakna kojima se dovodi svetlost, a u prstenu D_2-D_1 optička vlakna koja primaju difuzno svetlo sa hrapave površine (slika 6.34.a). Slučajne varijacije hrapavosti karakterišu se standardnim odstupanjem σ i korelacionom dužinom površine T . Snaga difuzione svetlosti P u prijemnim vlaknima opisuje se jednačinom

$$P = \beta(\sigma, T) \cdot K(d) \cdot I_0, \quad (6.67)$$

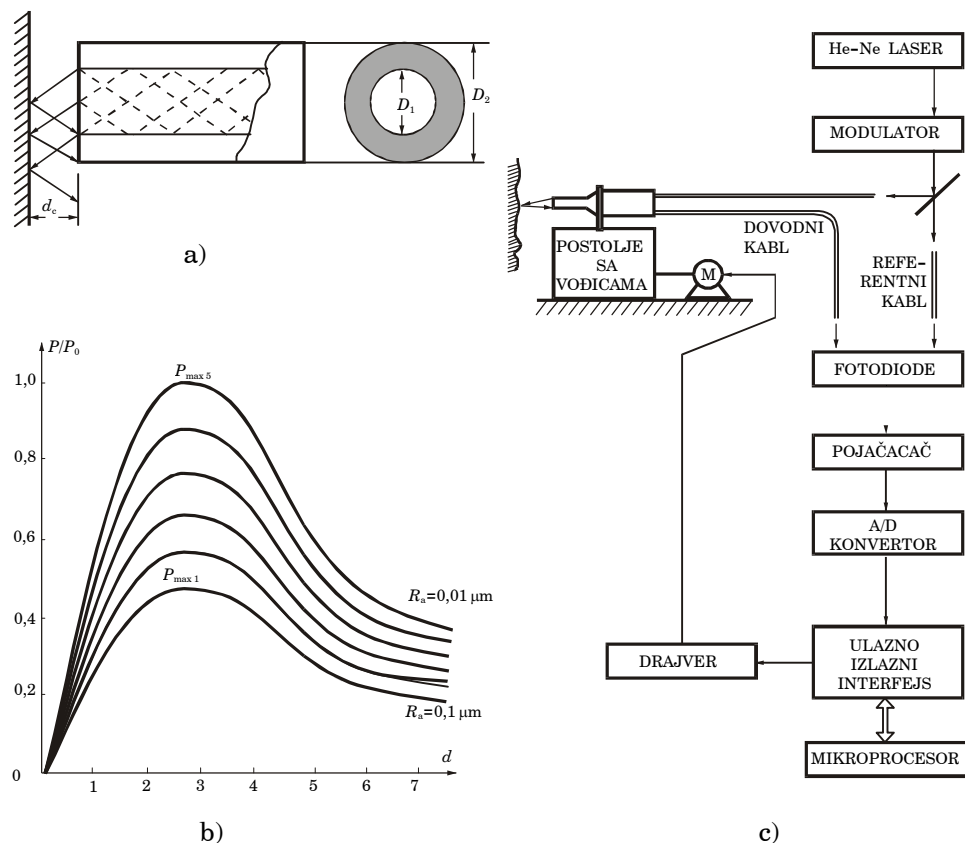
gde su:

- I_0 intenzitet svetlosti na izlazu iz dovodnih vlakana;
- $K(d)$ funkcija udaljenosti skenera od površine;
- β koeficijent koji zavisi od karakteristika vlakna i slučajnih varijacija hrapavosti.

Maksimalna vrednost snage primljene difuzne svetlosti P_{\max} dostiže se uvek pri određenoj udaljenosti $d=d_c$, koja zavisi od konstrukcije skenera, a naročito od rasporeda vlakana u skeneru. Varijacije maksimuma P_{\max} nastaju kada se promeni hrapavost, odnosno kada promene karakteristike hrapavosti površine σ i T (slika 6.34.b).

Automatizovani sistem za merenje hrapavosti sa skenerom prikazan je na slici 6.34.c. Svetlost iz He-Ne-lasera deli se u optičkom delitelju; jedan deo ide kroz dovodna optička vlakna skenera do merene površine, a drugi deo ide kroz referentna optička vlakna. Na taj način kompenzira se nestabilnost laserskog izvora. Pretvaranje konstantnog intenziteta svetlosti u naizmenični ($f=3,75$ kHz) provodi se radi eliminacije uticaja dnevnog svetla na

tačnost merenja. Dve fotodiode, postavljene na krajevima dovodnih i referentnih vlakana, daju na svojim izlazima električne signale čija se razlika pojačava i zapisuje kao relativna vrednost P/P_0 . Step motor menja udaljenost d i postupak se ponavlja sve dok se ne odredi P_{\max} , odnosno hrapavost na toj lokaciji. Zatim se prelazi na određivanje hrapavosti za sledeći proizvod. Dobijene vrednosti $P_{\max i}$ upoređuju se sa tabeliranim vrednostima nelinearne baždarne krive $P_{\max}(R_a)$ i interpolacijom računa odgovarajuća hrapavost R_i .

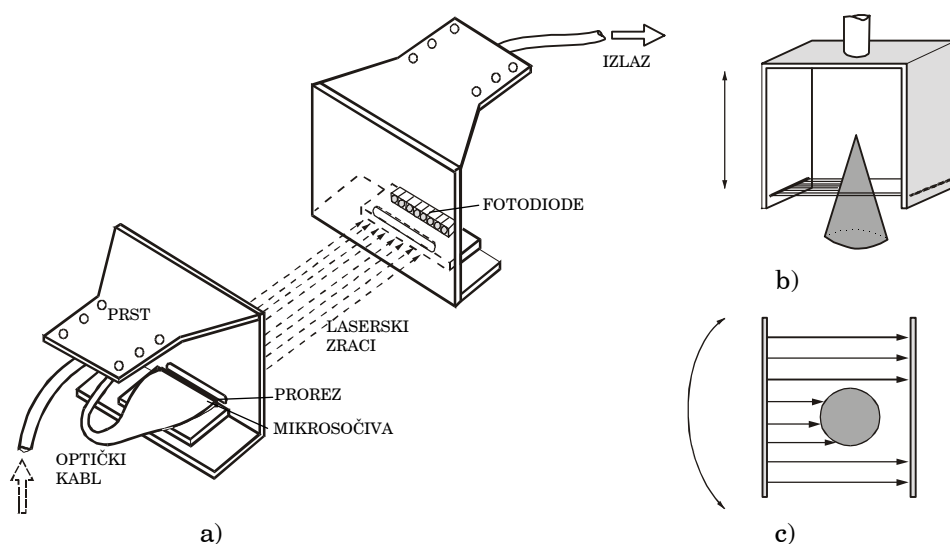


Slika 6.34. Sistem za merenje hrapavosti: a) optoelektronski skener, b) P -krive za pet uzoraka, c) strukturna blok-šema sistema

6.6.2. Dinamički senzor vizije

Dinamički optički senzor dobio je ime po tome što se vidno polje neprekidno menja zahvaljujući kretanju senzora zajedno sa manipulatorom i što je to kretanje bitno za akviziciju podataka pri inspekciji objekata. Senzor je specijalno napravljen za montažu na

šaku sa dva prsta (slika 6.35.a). Duž ivice jednog prsta postavljen je niz od osam mikrosočiva pomoću kojih se laserska svetlost razdvaja u osam paralelnih zraka. Na suprotnoj strani, tj. uz donju ivicu drugog prsta, postavljen je odgovarajući niz fotoprijemnika. Fotodiode detektuju prekid laserskog zraka kada se između prstiju nađe objekat. Ispred fotodioda su filteri koji propuštaju samo lasersko svetlo, čime se poboljšava odnos signal/šum. Prsti su napravljeni od aluminijumskih pločica 2,5×2,5 cm. Sočiva, filteri i fotodiode montiraju se na poleđini pločica da bi se sprečila mehanička oštećenja kod potpunog približavanja prstiju.



Slika 6.35. Hvataljka sa dinamičkim optičkim senzorom: a) konstrukcija, b) skeniranje uzdužnog preseka, c) skeniranje poprečnog preseka

Detekcija objekata obavlja se na dva načina. Kod prvog načina skeniranje se provodi u vertikalnoj ravni yz , a objekat se pomera duž ose z i preseca laserske zrake koji su horizontalnoj ravni (slika 6.35.b). Manipulator se može postaviti tako da su prsti u horizontalnoj ravni xy . Laserski zraci tada su orijentisani vertikalno, a objekat se pomera duž ose y . Dobijena slika objekta je njegova ortogonalna projekcija sa rezolucijom koja zavisi od širine laserskog zraka i tačnosti pozicioniranja robota, tj. prstiju. Poželjno je da rastojanje između laserskih zraka bude multipl širine zraka, jer se tada pomeranjem senzora (manipulatora) za ove multiple detektuje slika objekta unutar navedenog rastojanja. Ovo je izvodljivo sve dok širina zraka ne dostigne rezoluciju pozicioniranja robota (50–100 μm).

Drugi način skeniranja odvija se pri nekoj fiksnoj vrednosti z . Senzor rotira oko objekta, a laserski zraci stvaraju projekciju objekta u ravni xy (slika 6.35.c). Strategija prikupljanja podataka o objektu razrađena je kroz algoritam detekcije, odnosno način kretanja senzora. Na primer, zakretanje senzora odvija se po redosledu: 0° , 90° , 30° , 120° , 60° i 150° . Ako je potrebno da se odredi samo pravougaona površina (osnova) na kojoj objekat leži, dovoljne su dve pozicije: 0° i 90° .

6.6.3. Infracrveni senzori vizije

Vizuelizacija temperturnog polja. Informacije o temperaturnom polju dobijaju se na osnovu infracrvenog (termičkog) zračenja. To je oblast elektromagnetskog zračenja talasne dužine $\lambda=1-40 \mu\text{m}$. Zračenje se prati istovremeno za sve tačke scene (paralelna metoda) ili sukcesivno od jedne do druge tačke (metoda skeniranja). Za registraciju merne informacije o temperaturnom polju upotrebljavaju se fotopapir, filmska traka, ploče sa fotoelementima ili tankam slojem tečnog kristala, piroelektrika i dr. Nastali vidljivi zapis označava se kao termička slika, a sam uređaj koji služi za njeno dobijanje naziva se termograf ili termovizija.

Tela na Zemlji imaju temperaturu oko 300 K i maksimum spektralne gustine njihovog zračenja nalazi se na talasnoj dužini oko $10 \mu\text{m}$. Pošto je prostiranje infracrvenog zračenja u atmosferi najbolje unutar tzv. infracrvenih prozora $\lambda=3-5 \mu\text{m}$ i $\lambda=8-14 \mu\text{m}$, ova područja su posebno interesantna za tehničku praksu. Infracrveni senzori vizije imaju veliku perspektivu u mnogim oblastima karakterističnim za robotiku: zavarivanje, rudarstvo, svemirska istraživanja, metalurgija i dr. Vizija u IC spektru zasad je manje kvalitetna nego u vidljivom području zbog slabijih karakteristika IC senzora, zbog niskog kontrasta scene i visokog šuma (zračenja pozadine).

IC senzori. Termovizijske metode zasnivaju se na primeni optoelektronskih senzora (detektora) IC zračenja. Senzori zračenja rade na određenoj talasnoj dužini:

- u veoma bliskom infracrvenom području, $\lambda=0,76-1 \mu\text{m}$;
- u bliskom infracrvenom području, $\lambda=1-3 \mu\text{m}$;
- u srednjem infracrvenom području, $\lambda=3-8 \mu\text{m}$;

- u dugotalasnom infracrvenom području, $\lambda=8-14 \mu\text{m}$;
- u dalekom infracrvenom području, $\lambda=14-40 \mu\text{m}$.

Od kvantnih detektora upotrebljavaju se fotodioda, fotoprovodnik i fotoelement, a od termičkih termoelement, piroelektrik i bolometar – temperaturno osetljivi otpornik. Zbog dobrih osobina najviše se upotrebljavaju fotootpornici od indijum-antimonida (kao kratkotalasni senzori, $\lambda=3,5-6,6 \mu\text{m}$) i živa-kadmijum-telurida (kao dugotalasni senzori, $\lambda=8-14 \mu\text{m}$), koji imaju vremensku konstantu oko $1 \mu\text{s}$.

Senzori IC zračenja mogu biti aktivni ili pasivni. Aktivnim se nazivaju senzori osetljivi na IC zračenje veštačkog izvora koje je reflektovano sa predmeta na sceni. Pasivni senzori registruju zračenje predmeta u odnosu na reflektovano zračenje Sunca. Kao veštački izvor IC zračenja u veoma bliskom, bliskom i srednjem infracrvenom području primenjuju se sijalice sa zagrejanim volframovim vlaknom, poluprovodnički IC reflektori, IC diode i laseri.

Rezolucija merenja temperature. Rezolucija i dinamički opseg kod termovizije nisu dostigli efikasnost vizije u vidljivom delu spektra. Na primer, rezolucija za termoviziju na bazi piroelektričnih senzora zračenja je $0,5^\circ\text{C}$ (prag osetljivosti oko 10^{-11}W), a za termoviziju na bazi poluprovodničkih senzora do $0,05^\circ\text{C}$ (prag osetljivosti oko 10^{-15}W). Dalje povećanje rezolucije postiže se pomoću boljih senzora kao pijemnika IC zračenja ili primenom niza/matrice senzora. U tom slučaju je povećanje odnosa S/N, tj. rezolucije merenja temperature, proporcionalno kvadratnom korenu broja elemenata (piksela) u nizu: $N^{1/2}$. To se zapisuje pomoću jednačine za detektivnost niza:

$$D_{\text{niz}}^* = N^{\frac{1}{2}} \cdot D_{\text{elem}}^* \quad [\text{cm} \cdot \text{Hz}^{-1}/\text{W}], \quad (6.68)$$

gde je detektivnost jednog prijemnika

$$D_{\text{elem}}^* = (A \cdot \Delta f)^{\frac{1}{2}} \cdot D_{\lambda}, \quad (6.69)$$

pri čemu je A površina prijemnika i Δf njegova frekventna propusnost. Sa D_{λ} označena je spektralna detektivnost senzora, koja se definiše na talasnoj dužini λ kao recipročna vrednost $NETD_{\lambda}$

(temperaturna razlika ekvivalentna šumu, *Noise Equivalent Temperature Difference*):

$$D_{\lambda} = \frac{1}{NETD_{\lambda}} = \frac{E_{izl}/N_{rms}}{\Phi} . \quad (6.70)$$

Pojam $NETD_{\lambda}$ ima slično značenje kao snaga ekvivalentna šumu NEP (*Noise Equivalent Power*) za prijemnike optičkog signala, tj. predstavlja odnos upadnog fluksa zračenja Φ [W] i koeficijenta konverzije detektora (električni izlaz detektora E_{izl} podeljen sa efektivnom vrednošću šuma N_{rms}). Manji $NETD_{\lambda}$ odgovara kvalitetnijem prijemniku – tada su D_{λ} i D_{elem}^* veći, a rezolucija merenja temperature bolja.

Prema tome, pri realizaciji IC vizije postoji mogućnost primene jednog prijemnika sa velikim D^* ili N prijemnika sa manjim D . Oba rešenja imaju izvesna ograničenja.

Ograničenja u primeni jednog senzora zračenja.

Povećanje rezolucije merenja temperature scene povezano je sa problemima u tehnologiji izrade kvantnih senzora IC zračenja. Kao što je poznato, energija upadnog fotona $E=h\nu$ mora biti veća od širine zabranjene zone E_g da bi foton bio apsorbovan: $E \geq E_g$. Međutim, energija fotona obrnuto je proporcionalna talasnoj dužini $E=h\nu=hc/\lambda$. Zbog toga minimalna energija koja može da proizvede slobodne nosioce naelektrisanja u poluprovodniku određuje maksimalnu talasnu dužinu na koju senzor napravljen od takvog poluprovodnika reaguje. S druge strane, sa povećanjem energije fotona, tj. sa smanjenjem talasne dužine zračenja, opada sposobnost poluprovodnika da zaustavi (apsorbuje) fotone i proizvede slobodne nosioce naelektrisanja. Između ove dve granice je relativno usko područje osetljivosti poluprovodnika na zračenje.

Tehnologija izrade Si poluprovodnika za vidljivo i veoma blisko IC područje razrađena je veoma dobro. Tehnologija izrade poluprovodnika za IC područja većih talasnih dužina ni približno nije tako razvijena. Osnovni problem je da se dobije poluprovodnik sa malom širinom zabranjene zone koja će biti manja ili jednaka energiji fotona upadnog zračenja. Na primer, za talasnu dužinu zračenja 3–4 μm energija upadnog fotona je svega 0,25–0,08 eV. Poluprovodnici sa tako malom širinom zabranjene zone prave se od heterospojeva: binarnih, pseudobinarnih i tercijarnih struktura visoke homogenosti – i to samo za usko područje prijema.

Za termovizijsku tehniku važno je napomenuti da su kvantni detektori IC zračenja zbog male širine zabranjene zone osjetljivi na termički šum, naročito na višim temperaturama, pa se pomoću termostatskog sistema mora obezbediti stabilna radna temperatura na kojoj je $h\nu \gg kT$. Pored povećanja odnosa signal/šum na taj način postiže se i bolja detektivnost prijemnika. U tabeli 6.1 dat je uporedni pregled osnovnih karakteristika kvantnih i termičkih senzora zračenja koji su zastupljeni u termovizijskoj tehnici.

SENZORI IC ZRAČENJA	VRSTA MATERIJALA	TALASNA DUŽINA λ [μm]	RADNA TEMPERATURA T [K]	SPECIFIČNA DETEKTIVNOST D^* [$\text{cm}\cdot\text{Hz}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$]	
KVANTNI: - FOTODIODE	Si	1	300	$3\cdot 10^{13}$	
	GaAs	0,8	300	10^{12}	
	InSb	5	77	$5\cdot 10^{11}$	
	- FOTOOTPORNICI	PbS	2,5	300	10^{12}
		HgCdTe	8–12	77	$2\cdot 10^{11}$
		GaAs	4,2	100	$2\cdot 10^{12}$
TERMIČKI: - BOLOMETAR	Ge		2,15	$8\cdot 10^{11}$	
	Ge		300	$8\cdot 10^9$	
- PIROELEKTRIK	PVF ₂		300	10^8	
- TERMOELEMENT	(p)Si/Al		300	10^8	

Tabela 6.1. Karakteristike kvantnih i termičkih senzora IC zračenja

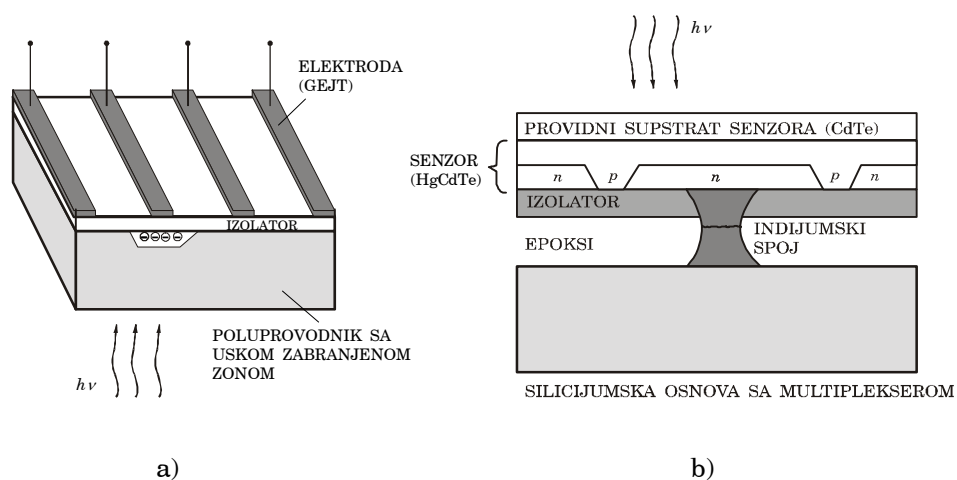
Ograničenja u primeni nizova i matrica IC senzora odnose se na skeniranje. Paralelno-serijska konverzija pomoću uskog snopa elektrona, slično kao u vidikon kamerama, ostvarljiva je samo za matrice sastavljene od piroelektričnih IC senzora za veoma blisko i blisko IC područje. Za veće talasne dužine elektronski snop bi morao imati manju energiju.

Monolitna integracija matrice IC senzora i multipleksera tipa CCD registra od istog materijala teško se ostvaruje jer sa povećanjem talasne dužine zračenja raste tamna struja ne samo kroz senzor već i kroz memorijske ćelije. Integracija u istom materijalu tipična je za fotodiode sa malom tamnom strujom (InSb, PbS, InAs) i za fotodiode na bazi Šotkijevih dioda od binarnih kombinacija silicijuma i plemenitih metala (PtSi, IrSi), (slika 6.36.a).

Stanje IC senzora koji rade na većim talasnim dužinama očitavaju se silicijumskim multiplekserom zahvaljujući hibridnoj

integraciji. Senzor od PbSnTe, HgCdTe ili GaInAs i multiplekser od silicijuma formiraju sendvič koji se tačka po tačka povezuje pomoću indijumskih provodnika (slika 6.36.b). Problemi koji se javljaju zbog nejednakih temperaturnih koeficijenata ekspanzije rešavaju se tzv. ostrvskom formacijom, gde je IC senzor tačkasto spojen metalnom vezom sa Si multiplekserom. Susjedni senzori razdvojeni su kanalima. Veličina piksela je veća od $40\ \mu\text{m}$.

Monolitna i hibridna struktura IC senzora izvodi se tehnikom fotolitografije.



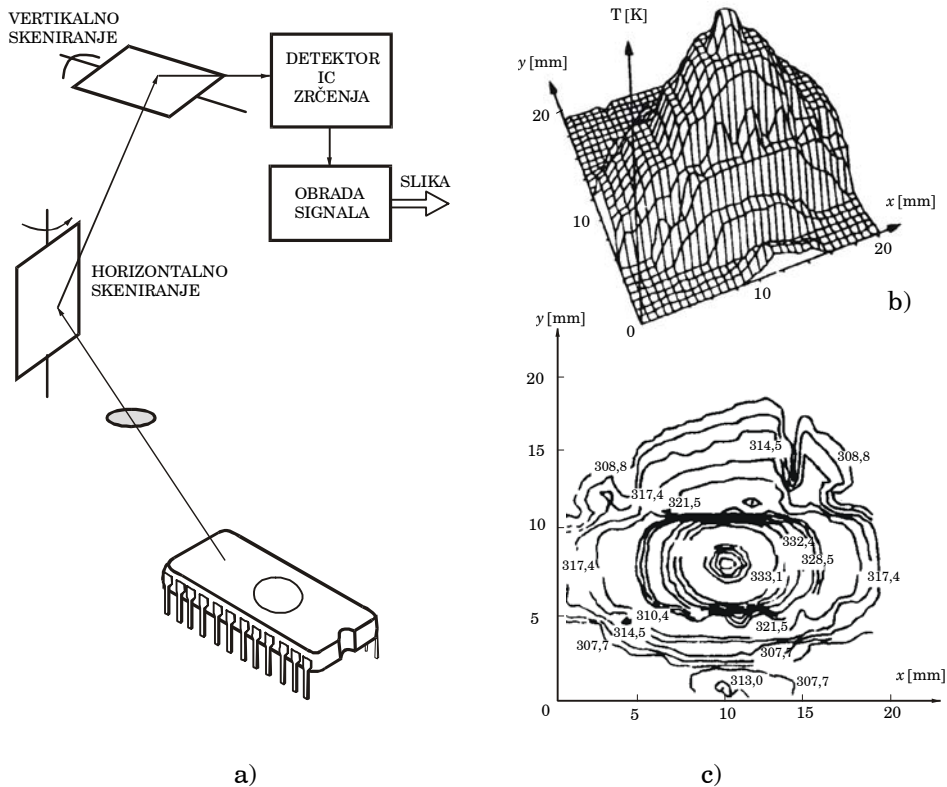
Slika 6.36. Kombinacija IC senzora i multipleksera: a) monolitna, b) hibridna (ostrvska formacija)

Termovizija sa skenerom sastoji se od skenera za pretraživanje scene, optičkog dela pomoću koga se zračenje fokusira na detektor IC zračenja i računarskog sistema za obradu slike (slika 6.37). Način skeniranja i prezentiranje slike prilagođeni su konfiguraciji i broju IC senzora u matrici. U prostijem slučaju detektor je jednoelementi senzor i skeniranje prostora ostvaruje se linija po linija. Elektronika za obradu slike treba da ima veliki propusni opseg, ali je zato osetljiva na šumove, pa je zbog kvaliteta slike broj linija ograničen na 70. Dobijeni električni signal sinhronizuje se sa skenerom, pojačava se i obrađuje kao video signal, tako da na ekranu nastaje crno-bela ili kolor slika temperaturnog polja. Ako je detektor IC zračenja višeelementni, tj. ako se sastoji od matrice IC senzora, skeniranje je

- redno (izlazni signali n senzora kumulativno se sabiraju uz primenu linija za kašnjenje čime se povećava detektivnost

sistema za faktor $n^{1/2}$, postižu se dobro temperaturno razlaganje i visoka frekvencija skeniranja, skenerski sistem je složeniji i bučniji, slika je homogena, broj senzora je ograničen na 30, pristupačna cena)

- paralelno (istovremeno se skenira n linija pomoću linijskog detektora sa n senzora, postiže se lošije temperaturno razlaganje, skenerski sistem jednostavniji i tiši, slika je nehomogena zbog nejednakih karakteristika senzora u liniji, potreban veliki broj senzora i pojačavača, veća cena)
- redno-paralelno (kombinovano skeniranje kojim se koriste prednosti rednog i paralelnog skeniranja, pogodno za matrice detektore zračenja).



Slika 6.37. Infracrveni senzor vizije sa skenerom: a) struktura, b) prostorni dijagram temperature za testirano integrisano kolo, c) konturni dijagram temperature

Pored metroloških i eksploatacionih karakteristika, za infracrvene senzore vizije sa skenerom definišu se i parametri skeniranja: tip trajektorije (najčešće linijski sa 100–200 linija), period skeniranja 0,02–2 s, prečnik tačke d kojom se skenira scena, koeficijent trenutnog viziranja $p=d/R$ (R je rastojanje između senzora vizije i posmatrane tačke pri čemu je $p=d_1/R_1=d_2/R_2=\dots=d_n/R_n=const$), koeficijent integralnog viziranja $P=(L+d)/R$, rezolucija skeniranja $r=P/p$ i vreme zadržavanja u jednoj tački scene.

Termovizija sa elektronskom kamerom, cevnom ili CCD, savremenije je konstrukcije u poređenju sa skenerskim sistemom. Sastoji se od kamere, monitora, mikroprocesorskog uređaja za pretvaranje infracrvene slike u vidljivu i video rekordera. Po svome vanjskom izgledu infracrvena kamera ne razlikuju se od kamere namenjene za vidljivo područje. Razlika je jedino u detektoru zračenja koji je odabran za određeno IC područje, najčešće u opsegu 2–5 μm .

Dimenzije Si piksela za vidljivo i veoma blisko infracrveno područje približno su jednake: 7×7 μm . Formati za nizove piksela u jednom čipu su 24×1–5732×1, a za matrice različite kombinacije do najvećeg formata od 4096×4096 piksela. Međutim, sa složenošću strukture poluprovodnika za veće talasne dužine dimenzije piksela povećavaju se na 50×50 μm , pri čemu su tipični formati za nizove 20×1–240×1 i za matrice 32×32–300×300. Veći formati od standardnih mogu se dobiti povezivanjem više čipova u jednu celinu.

LITERATURA

1. T.Akuta, Y.Negishi: „Development of an automatic 3D shape measuring auto-focusing“, *Measurement*, Vol. 8, No. 44 (180–187), 1990.
2. P.Courtney, M.S.Beck, W.J.Martin: „A vision guided life-science laboratory robot“, *Meas. Sci. Technol.*, 2(97–101), 1991.
3. K.H.Herrmann: „Infrared imaging with linear and matrix detector arrays: A challenge to semiconductor optoelectronics“, *Measurement*, Vol. 8, No.1(17–20), 1990.

4. A.Pugh: „*Robot sensors: Vol1 – Vision*“, IFS (Publications) Ltd. Bedford and Springer-Verlag Berlin, 1986.
5. R.Thomas: „*Computer vision in industry, Artificial intelligence in engineering*“, John Wiley and Sons, Chichester (England), 1991.
6. A.Yu, Borisenko, O.R.Mochalkina, R.G.Mukhametsin: „Hardware and software complex for automatic laser beam focusing and adjustment based on circular-radial phototransistor array“, *Sensors and Actuators A*, Vol. 28, No. 1 (173–177), 1991.
7. Z.Dinghai, L.Haibao, Y.Shenghua: „The fibre optic sensor in the in-process measurement“, *Measurement*, Vol. 9, No. 4 (172–174), 1991.
8. M.Popović: „*Senzori i merenja*“, Viša Elektrotehnička škola, Beograd, 1995.
9. W.Gerlach, K.W.Müller: „The single pulse infrared method (SPIR): a new non-destruction method to investigate power devices at high currents“, *Meas. Sci. Technol.*, 2(298–303), 1991.
10. R.Murn, D.Peček: „Computer vision measuring system“, *Measurement*, Vol. 8, No. 4. (161–164)
11. B.Culshaw: „Photodetectors and photodetection“, *Sensors and*
12. *Actuators A*, Vol. 10, No. 3–4 (263–286), 1986.
13. M.G.Collet: „A solid-state image sensors“, *Sensors and Actuators A*, Vol. 10, No. 3–4 (287–302), 1986.
14. L.R.Ziegler, R.C.Dorf: „An analysis of the geometry of lightstripping vision system for feedrate control in robot welding and other industrial processes“, *Robotics*, Vol. 3 (167–173), 1987.
15. P.G.Davey, J.S.Wiejak: „Seam finding, tracking and control for automotive fusion welding“, *Proc. of the 2-nd Int. Conf. on Robots in the Automotive Industry*, 135–142, IFS (Publications), Birmingham, 1985.
16. J.Glasser, F.Chazallet: „Integrated image sensors: An introduction to their functioning principles, structures and characteristics“, *Sensors and Actuators*, Vol. 7, No. 2 (117–134), 1985.
17. S.Nagarjan, P.Banerjee, B.A.Chin: „Control of the welding process using infrared sensors“, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 1 (86–93), 1992.
18. M.Topalović: „*Televizija (druga knjiga). Višedimenzionalna digitalna obrada video signala*“, RTS, Beograd, 1993.
19. S.R.Ruocco: „*Robot sensors and transducers*“, Halsted Press, John Wiley & Sons, 1987.
20. M.Milačić: „*Teorija prepoznavanja inženjerskih sistema*“, Mašinski fakultet, Beograd, 1987.

21. D.A.Scribner, M.R.Kruer, J.M.Killiany: „Infrared focal plane array technology“, *Proc. of the IEEE*, Vol. 79, No. 1 (66–85), 1991.
22. B.Livada, A.Gavrilović: „Tehnologija proizvodnje i primena detektora za termovizijske uređaje“, *Naučno-tehnički pregled*, Vol. XXXV, br. 7–8 (43–53), 1985.
23. R.Dorf: „*International Robotics Encyclopedia*“, John Wiley & Sons, New York, 1988.
24. A.C.Staugaard: „*Robotics and AI. An introduction to applied machine intelligence*“, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1987.

INDEKS POJMOVA

A

adaptacija komercijalnih kamera [199](#)
akrilatni senzor [121](#)
aktivna percepcija [78](#)
aktivno usaglašavanje [54](#)
akvizicija slike [159](#)
analiza
 scene [159](#), [173](#)
 uvlačenja [57](#)
apsorpcija bočne i ugaone greške [60](#)
asembliranje [56](#)
 automatsko [177](#)

B

brzina ultrazvuka [41](#)

C

CCD elementi [121](#), [191](#), [218](#)
centar prilagodavanja [54](#), [58](#), [59](#)
centroid [78](#)

D

detekcija
 ivica [163](#)
 kontakta [62](#)
 prisustva [15](#)
 smera vrtnje [32](#), [35](#)
 ugaone brzine [32](#), [35](#)
dijagram usmerenosti [43](#)
dinamički
 senzor vizije [220](#)
 opseg [82](#), [99](#), [103](#), [119](#)
direktivnost [44](#)
distribucija sile [78](#), [81](#), [94](#)

E

eho [144](#), [149](#), [150](#), [155](#)
eksczes pojačanja [49](#)
elastomer [61](#), [83](#), [87](#), [122](#), [132](#)

elektromagnetski

 senzori blizine [26](#)
 taktilni senzori [97](#)
elektromehanički mikroprekidači [24](#)
elektronske kamere [188](#)
elektronsko skeniranje [148](#), [149](#), [150](#)

F

faktor distorzije [190](#)
frekvencija prekidanja [50](#)
frekvencija preključivanja [23](#)
filtracija šumova [160](#)
fleksibilni zglobovi [63](#)
fotodioda [61](#), [189](#), [191](#), [192](#)
FFT [167](#)
FT matrica [197](#)
Furijeova dekompozicija [166](#)

G

geometrije ivica [174](#)
generacije [13](#)
 adaptivni roboti [14](#)
 inteligentni roboti [14](#)
 programski roboti [13](#)
granica klizanja [80](#)

H

histerezis [22](#)
hodajuće mašine [11](#)
Holografija
 efekt [34](#)
 napon [35](#), [36](#)
hrominentni [198](#)
Hueckelova maska [170](#)
hvataljka [10](#)

I

identifikacija [15](#)
IL matrica [196](#)

induktivni senzor
 blizine [26](#)
 matematički modeli [28](#)
 montaža [31](#)
 način gradnje [31](#)
 karakteristike [18](#), [33](#)
 struktura [27](#)
 sile i momenta [70](#)
industrijski robot [7](#), [9](#), [11](#)
inspekcija [15](#)
integrisani kapacitivni senzor [122](#), [124](#)
interfejs robota i senzora [16](#)
izmaknuti centar prilagodavanja [54](#), [59](#)
izdvajanje regija [170](#), [171](#)

K

kamera [183](#), [190](#), [197](#)
TCL kamere [202](#)
kapacitivni senzor
 blizine [37](#)
 taktilni [106](#)
 cilindrični [110](#), [123](#)
kalibraciona matrica [67](#)
klasifikacija
 likova [158](#)
 senzora [18](#)
klasični senzor [54](#)
klizanje [80](#)
kolor kamera [197](#)
komparacija [168](#), [169](#)
kombinovani taktilni senzori [139](#)
kontaktne sile [53](#)
kontrola
 dimenzija [176](#)
 kvaliteta [176](#)
kontroler
 lokalni [17](#)
 robota [17](#)
kumulativna greška [155](#)

L

lociranje [14](#)
luminentni [197](#)

M

magnetootpornik [98](#), [102](#)
manipulativna operacija [9](#), [13](#)
manipulator [7](#), [17](#), [18](#)
mehaničko skeniranje [146](#)
merne trake [68](#)
merni senzori [18](#)

mešanje svetlosti [197](#)
metrološki
 kvalitet [12](#)
 pokazatelji [18](#)
mikromehanička obrada [125](#)
minimalna konfiguracija [7](#)
monitoring [14](#)
multipleksiranje [90](#), [108](#), [129](#), [195](#)

N

nedestruktivna analiza [151](#)
normalne sile [78](#)

O

očitanje fotonaelektrisanja [194](#)
ograničenja scene [159](#)
operacije asembliranja [53](#), [56](#), [65](#)
operativno preklopno rastojanje [22](#)
opseg delovanja [38](#)
optički delitelj [184](#)
optički parovi [48](#)
optičko vlakno [50](#), [120](#)
optoelektronski senzori
 proksimiti [47](#)
 taktilni [118](#)
optoelektronski skener [218](#)

P

pasivna i aktivna percepcija [78](#)
pasivno prilagodavanje [59](#)
pijezoelektrični
 primopredajnici [43](#)
 taktilni senzori [113](#)
pijezootpornici [124](#), [126](#)
piksel [182](#)
piroelektrici [131](#)
plastično vlakno [50](#)
podešavanje
 kontrasta [161](#)
 sjajnosti [161](#)
poluprovodničke (CCD) kamere [191](#)
ponovljivost [22](#)
pozicioniranje [13](#), [64](#)
poziciono upravljanje [13](#), [64](#)
povezivanje robota i senzora [17](#)
površinski kontakt [78](#)
prag detekcije [154](#)
predikcija [15](#)
prekidanje optičkog signala [48](#)
preklopno rastojanje [22](#)

efektivno [22](#)
realno [22](#)
operativno [22](#)
preključivanje taktela [94](#)
prepoznavanje [109](#), [144](#), [147](#), [175](#)
pretprocesiranje [160](#)
pretraživanje taktela [90](#), [92](#), [94](#), [101](#),
[106](#), [108](#), [112](#)
procesiranje slike [159](#), [180](#), [187](#)
prostorna
 filtracija [166](#)
 rezolucija [82](#), [94](#), [103](#), [105](#)

R

radna okolina [16](#), [182](#)
RCC [59](#)
 senzORIZOVANI [61](#)
 virtuelni [62](#)
refleksija [48](#), [50](#)
reflektujuća površina [44](#)
rekonstrukcija objekta [152](#)
rezonatna frekvencija [43](#)
rid-releji [25](#)
Robertsov operator [164](#)
robot [7](#)
 adaptivni [14](#)
 autonomni [11](#)
 cilindrični [8](#)
 industrijski [7](#), [9](#)
 inteligentni [14](#)
 mobilni [11](#)
 industrijski [7](#), [9](#)
 pravougaoni [8](#)
 primena [9](#), [11](#)
 programski [13](#)
 sferni [8](#)
 univerzitetska učila [11](#)
 zglobni [8](#)
robotaska
 ruka [7](#)
 šaka [7](#), [140](#)

S

selektovanje taktela [90](#)
senzor
 pozicije laserskog zraka [210](#)
 sa nizovima elektroda [89](#)
senzori
 definicija [12](#)
 blizine [21](#)

definicija [12](#), [21](#)
ekonomski parametri [23](#)
električne karakteristike [23](#), [28](#)
elektromagnetski [26](#)
kapacitivni [37](#)
označavanje [23](#)
specijalni [33](#)
statičke karakteristike [21](#)
tehničke karakteristike [21](#), [33](#)
ultrazvučni [39](#)

klizanja [80](#)

merni [18](#)

podela [18](#)

sile i momenta [53](#)

 dvokomponentni [72](#)

 izvan robota [74](#)

 kompaktni [65](#)

 modularni [65](#), [69](#)

 na prstima [72](#)

 sa mernim trakama [70](#)

 šestokomponentni [68](#), [69](#), [70](#)

 u zglobu šake [58](#), [63](#)

 više-komponentni [65](#)

slike [19](#)

vizije [158](#)

 elektronske kamere [188](#)

 infracrveni [222](#)

 karakteristike [181](#)

 specijalni [217](#)

 senzorske matrica [187](#)

 sa fokusiranjem slike [202](#)

 sa strukturnim svetlom [203](#)

 sa laserskim daljinarom [212](#)

senzori i roboti [13](#)

senzorska staza [16](#)

senzorske funkcije [14](#)

senzorski sto [74](#), [75](#)

sigurnost i zaštita [16](#)

sinhronizovana triangulacija [209](#)

sjajnost piksela [165](#)

skeniranje [146](#), [149](#)

slabljenje ultrazvučnog talasa [41](#), [42](#)

Sobelov operator [165](#)

spajanje ivica [169](#)

standardni test objekat [26](#), [44](#), [48](#)

stepen inteligencije [13](#)

stepeni slobode [9](#)

strategija kretanja [147](#)

strukturno svetlo [184](#), [205](#)

svetlosna zavesa [16](#)

Š

šabloni linija [169](#)
šaka [9](#), [139](#)

T

tangencijalne sile [78](#)
tankoslojni
 induktivni senzor [34](#)
 kapacitivni [126](#)
 otpornički polimer [90](#)
 pjezootpornici [125](#)
 termootpornici [130](#)
taktel [80](#)
taktilna matrica [90](#), [139](#)
taktilna percepcija [78](#), [79](#), [136](#)
taktilni senzori [78](#)
 elektromagnetski [97](#)
 induktivni [97](#)
 magnetootpornički [98](#)
 magnetoelastični [103](#)
 kapacitivni [105](#)
 cilindrični [110](#)
 integrirani [122](#), [124](#)
 pločasti [106](#), [109](#)
 magnetoelastični [104](#)
 otpornički [87](#), [128](#)
 pjezoelektrični [112](#)
 termički [126](#)
 ultrazvučni [117](#)
taktilni sistemi [138](#)
tehnika
 karakterističnog odziva [144](#)
 nagrizanja [123](#)
 slike [144](#)
tehnike
 osvetljavanja [184](#)
 prepoznavanja [144](#)
termootpornici [128](#)
termička percepcija [126](#)
termistor [126](#), [128](#), [129](#)
termoelementi [132](#)
 metalni [133](#)
 poluprovodnički [132](#)
 termobaterija [135](#)

termovizija [222](#), [226](#)
tipologija senzora sile [54](#)
TOF [40](#)
triangulacija [202](#), [203](#), [208](#)
traganje [64](#)

U

uklapanje [64](#)
ultrazvuk [41](#)
ultrazvučna percepcija [142](#)
usaglašavanje [53](#)
ultrazvučni senzori
 blizine [39](#)
 elektrostatički [43](#)
 taktilni [118](#)
 oblika [152](#)
ultrazvučni
 sistemi [144](#)
 talas [143](#)
ultrazvučna vizija [143](#)
uvlačenje [56](#), [64](#)

V

veštačka
 koža [83](#)
 taktilna percepcija [136](#)
 vizija [158](#)
vidno polje [180](#), [182](#), [183](#)
vizuelna percepcija [158](#)
vođenje robota [177](#)
vreme preleta [143](#), [153](#)
vreme odziva [49](#)
vidikon [189](#)

Z

završni mehanizam [7](#), [9](#)
zavarivanje [9](#)
zavisnost brzine ultrazvuka [41](#)

X

XY matrica [196](#)