

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство
Ниво студија: Дипломске академске студије
Модул: Примењена механика и аутоматско управљање
Предмет: Производне технологије 1
Број индекса: 220/92

Стевановић М. Дејан

Индустријски роботи у производним технологијама

дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Богдан Недић - ментор

2. _____

3. _____

Датум

одбране: _____

Оцена: _____

UNIVERZITET U KRAGUJEVCU
FAKULTET INŽENJERSKIH NAUKA
Katedra za: PROIZVODNO MAŠINSTVO
Predmet: Proizvodne tehnologije

DIPLOMSKI RAD

sa temom:

INDUSTRIJSKI ROBOTI U PROIZVODNIM TEHNOLOGIJAMA

Kandidat: **Stevanović Dejan** , broj indeksa **220/92 w** .

U okviru diplomskog rada kandidat treba da izvrši sistematizaciju podataka vezanih za industrijske robote. Analizom podataka obuhvatiti značaj primene industrijskih robota, opisati kinematski model robota, senzore, pogon i dati primer primene.

Diplomski rada treba da sadrži sledeće celine:

1. Uvodna razmatranja,
2. Značaj primene robota,
3. Model robota,
4. Kinematika robota,
5. Senzori,
6. Pogon robota,
7. Primer primene robota,
8. Zaključci,
9. Literatura.

PREDMETNI NASTAVNIK

Prof. dr Bogdan Nedić

Kragujevac, septembar, 2013. god.

Садржај

Увод.....	4
1.0 Значај роботике.....	6
1.1 Индустијски развој робота.....	6
1.2 Дефиниција и генерације робота.....	8
1.3 Подела роботских система.....	10
2.0 Модел робота.....	14
2.1 Основни појмови.....	14
2.2 Кинематски ланци.....	19
2.3 Структура индустријских робота.....	21
3.0 Радни простор.....	26
3.1 Геометрија радног простора.....	26
4.0 Кинематика робота.....	33
4.1 Опште теоријске поставке директне кинематике.....	33
4.2 Појам спољашњих и унутрашњих координата.....	33
5.0 Сензори у роботици.....	36
5.1 Уводна разматрања.....	36
5.2 Подела сензора.....	37
5.3 Сензори унутрашњег стања.....	38
5.3.1 Сензори положаја.....	39
5.3.1.1 Инкрементални енкодер.....	39
5.3.1.2 Апсолутни енкодер.....	40
5.3.1.3 Резолвер.....	42
5.3.1.4 Индуктосин.....	43
5.3.1.5 Потенциометри.....	44

5.3.2	Сензори брзине.....	45
5.3.2.1	Тахогенератор.....	45
5.3.2.2	Дигитални тахометри.....	46
5.3.3	Сензори отклона.....	46
5.3.3.1	Си-сензори.....	47
5.3.3.2	Пијезоелектрични сензор.....	47
5.3.4	ИНС (инерционални навигациони систем).....	48
5.3.4.1	Механички жирокоп.....	48
5.3.4.2	Геомагнетични сензори.....	50
5.4	Сензори спољачњег стања.....	50
5.4.1	Графички приказ спољашњих сензора.....	51
6.0	Погони робота.....	59
6.1	Врсте погона робота.....	59
6.2	Пнеуматски погон.....	60
6.3	Хидраулични погони.....	64
6.4	Електрични погони.....	66
6.4.1	Мотори једносмерне струје (ДЦ мотори).....	66
6.4.2	Електромотори наизменичне струје (АЦ мотори).....	68
6.4.3	Корачни мотори.....	70
7.0	Роботи за брушење и полирање.....	73
7.1	Брушење и полирање.....	73
7.2	Брушење и полирање у ланцу производње.....	75
7.3	Иновативни роботски системи.....	78
8.0	Закључак.....	82
9.0	Литература.....	83

Увод

Интелигентне машине и системи различитог нивоа сложености су данас све присутнији за обављање различитих процеса. Интелигентни машински системи ка што су : роботи, технолошке ћелије и слично чине стуб CIM -система (Computer Integrated Manufacturing) који представља темељ концепције сваке фабрике будућности. Индустријски роботи су аутоматизовани системи који користе рачунар као интелигентни сегмент управљања.

Дефиницију робота као репрограмабилне и мултифункционалне механичке структуре дала је Интернационална организација за стандарде : Робот је машина која се састоји од механизма са више степени слободе кретања, а способан је да врши манипулацију са алатом, радним предметом или неким другим средством.[1].

Комерцијализација робота почиње почетком седамдесетих година XX века. Аутоматизација процеса и машина налази примену првенствено код изводјења производних процеса и управљањем машинама а мање код других такође важних производних активности као што су опслуживање радног места, позиционирање радног комада и слично.

Индустријски роботи имају примену за:

- # Послуживање радног места
- # Држање материјала на радној позицији у свом фазама израде и операциони транспорт.
- # Обављање технолошких операција (заваривање, брушење, полирање, полирање, бојење, лемљење...)
- # Аутоматску монтажу
- # Претпроцесну, процесну и постпроцесну контролу.

Индустријски роботи су идеални за послове који се сматрају тешким и непогодним за људе. Користе се обављање монотоних и много понављаних послова. У пословима где се тражи висок квалитет и велика продуктивност такође се користе индустријски роботи.

Савремена индустријска производња у већини својих грана успешно користи роботске системе. Када је у питању покретљивост појединих чланова робота, могућност извођења различитих путања, способност досезања било које тачке манипулационог простора са постизањем одређене оријентације, може се рећи да су могућности примене робота у производњи практично неограничене.

Оно што ограничава примену робота у појединим операцијама јесте питање економичности. Није рентабилно да једна роботска структура великог волумена радног простора, великих брзина и

снаге, обавља радне задатке за које у потпуности на искоришћава своје способности. Из тог разлога се индустријски роботи својим дизајном прилагођавају својим наменама.

Један од битних разлога примене роботских система у индустрији јесте и хуманизација рада, поготово на пословима штетним по људско здравље (рад у загађеној средини, прашини, високој температури, рад на монотоним и замарајућим пословима). Роботи налазе примену не само у индустрији, већ и у другим областима живота. Роботи са користе у болницама за помоћ болесницима, лечење односно хируршке захвате, у домаћинству за обављање разних кућних послова, итд.

У првом поглављу је дат историјски преглед развоја роботике, дефиниција и подела индустријских роботских система. У другом поглављу су дати основни појмови модела робота, у трећем се дефинише и описује радни простор. Кинематика робота је објашњена у четвртом поглављу, док је у петом детаљно описани сензори који се употребљава при изради индустријских робота. У шестом су описани неки основни актуатори који се најчешће користе у роботици. У седмом је описана примена индустријских робота у операцијама брушења и полирања. Осмо поглавље се односи на закључак док је у последњем, деветом, дат списак литературе коришћене за писање овог рада.

1.0 Значај роботике

1.1. Индустијски развој робота

Роботи су људима били и увек ће бити вечита преокупација. Жеља човека да неко други ради уместо њега, углавном тешке и заморне послове, кроз историју се решавала на разне начине-робови, кметови, али било је и оних настојања која су ишла у правцу да се тај проблем реши применом технике. С обзиром да развој технике и средстава за производњу није био равномеран, то је и историјска промена аутоматике била адекватна том развоју.

Идеје израде механичких аутомата су доста старе, почев од античког доба 880. год. п.н.е. Хомер описује покретне трonoшце у Илијади, затим Аристотел, 350. год. п.н.е., маста о механизмима чији ће се рад темељити на покорности и предосећајима, да би се 1350. год. монтирао механички петар на врх катедрале у *Strasbourg* (Француска). Било је потребно готово 500 година (1801. *Joseph-Marije Jacquard*) до проналаска аутоматског текстилног разбоја који је управљан бушеним картицама. Након тога *Sewar Babbitt* пројектује моторизовани кран и хватаче за вађење челичних одливака из високих пећи.[1].

Назив робот се први пут сусреће у XX веку. Овај назив увео је чешки књижевник *Karel Capek* 1921. године у својој драми *R.U.R. (Rossums Universal Robots)*. У овој драми су описана бића слична људима, али без емоција. Израз робот потиче од чешке речи робота што значи најамник, кмет. Године 1938. *Willard Pollard* и *Harlod Roselund* уводе механичку руку са зглобовима за аутоматизовано бојење распрашивањем у фирми *DeVilbiss Co.*[1].

Писац научне фантастике *Isac Asimov* такође у својим делима користи појам робота. Он је и дефинисао, у свом делу *Runaround* објављено 1942. године први пут три закона роботике који гласе:

1. робот не сме озледити људско биће, нити због своје неактивности сме дозволити да људско биће буде озлеђено;
2. робот мора слушати наредбе која му дају људска бића, осим у случају када би те наредбе кршиле први закон;
3. робот мора штитити своју егзистенцију, осим ако би то кршило први и други закон.

Ови закони су важећи за конструкторе робота и данас.

Прави напредак развоја робота је учињен у двадесетом веку и то захваљујући проналаску бинарне машине-рачунара. Рачунар је успео да удахне живот у механичку конструкцију робота. Роботи су

по својој природи веома сложени системи који захтевају примену савремених метода, базираних на теорији машина, теорији аутоматског управљања и савремених средстава рачунске технике. Када су све ове области достигле висок ниво развоја појављују се и роботи.

Средином XX века појављују се и нове технологије које битно утичу на развој роботике. Те нове технологије се односе на нумеричко управљање и телеоператоре.

Нумеричко управљање је управљање машином алатком дигиталним путем, док се под појмом телеоператор подразумева употреба даљинског манипулатора којим управља човек.

Први телеоператори су се појавили почетком педесетих година XX века, а користили су се у области нуклеарне технологије. Тако је 1951. Године *Raymond Goertz* дизајнирао телеоператорску руку за руковање радиоактивним материјалом за потребе *Atomic Energy Commission*. Комбинацијом нумеричког управљања и телеоператора поставили су се основе за развој модерног робота.[1].

Индустријски робот се од својих претеча разликује по томе што је, супротно манипулатору, програмски управљан, а за разлику од НУ алатне машине, има могућност адаптације.

Велики допринос развоју области роботике и робота дао је британски проналазач *Walter Kenward* (манипулатор са нумеричким управљањем) и амерички научник *George C. Devol* који је 1946. године патентира опште наменски уређај за управљање фабричким машинама, користећи магнетно складиштење инструкција. На *Carnegie Mellon University (CMU)* 1950-те године, *Harbert A. Simon*, *Allen Newell* и *J. Clifford Shaw* постављају камен темељац вештачкој интелигенцији (AI).[1].

Првог индустријског робота је пројектовао *George C. Devol* 1954. године чији је оригинални назив програмед артикле трансфер што би у слободном преводу било, систем за програмирано премештање предмета. Године 1961. заједно са *Josephom F. Engelbergerom* израђује првог индустријског робота. На реализацији ових патената развија се и фирма *Unimation Inc.*, која се сматра светским роботским пионом.

Прво инсталирање индустријског робота завршено је 1962. године у фабрици аутомобила *General Motors* у *Trentonu, New Jersey*. *CMU* формира институт за роботiku 1965. године. Средином 60-тих година роботи су имали способност бирања једног од неколико снимљених програма. У *General Electric Co.*, *Ralph Moser* 1967. год. дизајнира *Walking Truck*-а, великог робота са четири ноге, за потребе превоза терета у Пентагону. Први мобилни робот, назван *Shakey*, који поседује визуални систем за распознавање и вештачку интелигенцију појављује се на *Stanford Research Institute (Sri)*. Године 1973. На *Stanford Research Institute (Sri)* развијена је прва рачунарска интегрисана роботска станица за монтажу пумпи. Велики утицај на развој робота има брзи развој рачунара. *NASA* спушта роботске руке на Марс за мисије *Viking I* и *II* 1976. године а 2011. године роботизовано возило за прикупљање узорака тла и фотографисање марсовог окружења.

Почетком 80-тих појављују се роботи који су у стању променити и прилагодити своје понашање

према стању околине у којој се налазе. Таква способност представља интелигенцију. Покретни робот са шест ногу развијен је на *Odetics Inc.* 1983. године. Робот, *Robodoc*, којег је развио *Dr William Bugar i Howard Paul (Integrated Surgical Systems Inc. i University Of California at Davis)*, обавља 1990-те операцију кука код пса, а 1992. године на човеку. Садашња истраживања у области роботике показују да су роботи механички све савршенији, а њихови управљачки системи поседују све више вештачких чула и елемената вештачке интелигенције. Тако на *Massachusetts Institute of Technology (MIT) Rodney A. Brooks* почиње правити *Cog*-а, робота који се едукује као и човек. 1996. године *Honda* открива *p-2* човеколиког робота који хода. Одржан је и први годишњи *RoboCup* турнир 1997. год. у Нагоја, Јапан, а затим су следили турнири одржани у Паризу, Штохолму и Мелбурну. На Марс је лансиран 1997. год. *NASA* -ин робот *Pathfinder*, а *Sajourner rover* робот истражује марсовско тло. На турниру *RoboCup*-у 2000., три хуманоидна робота се сусрећу први пут: *Jonny Walker* са *University of Western Australia*, *Mk-II* са јапанског *Aoyama Gakuin University* и *Pino* са *Kitano Symbolic Systems Project*-а.

Може се казати да су роботи важан део система у производњи, јер се примењују за аутоматизовање производних процеса. Своју важну примену доказују у сарадњи са осталим компјутерски управљаним развојним и производним системима. Доказ за то је ЦИМ-компјутерски интегрисана производња.

1.2 Дефиниција и генерације робота

Једноставна и усаглашена дефиниција робота не постоји, тако да је дефиниција робота различита у појединим земљама и међународним организацијама за стандардизацију:

ISO (Internacional Standard Organisation)

"Индустријски робот је аутоматски, сервоуправљани, репрограмабилни, вишефункцијски манипулатор који има више степени слободе кретања, који је погодан за руковање материјалом, деловима, алатима или посебним уређајима за извршавање варијабилних програмираних операција. Индустријски роботи обично имају једну или више руку, управљачки уређаји са могућношћу меморисања, а понекад користе сензоре за прикупљање информација из околине. Они су вишенамениски уређаји који врше понављајуће операције и за извршавање тих операција имају могућност прилагођавања околини."

USA

"Робот је вишефункционални манипулатор са могућношћу репрограмирања а предвиђен је да преноси материјале, делове, алате или посебне направе кроз различите програмиране покрете у циљу испуњавања различитих задатака."

ВЕЛИКА БРИТАНИЈА

"Индустријски робот је репрограмабилни уређај који је начињен за манипулисање и транспортовање делова, алата, или специјализованих производних направа преко променљивих покрета за извођење појединачних производних задатака."

ЈАПАН

У дефиницију робота укључени су и чврсто програмирани манипулатори. Јапанска асоцијација индустријских робота (Јапан Индустијал Робот-ЈИРА), разликује два појма у индустријској роботици и то појам манипулатора и појам робота. Њихова даљна подела је у суштини заснована на врсти и начину уношења информација или приступа са становишта научних метода.

Под појмом манипулатора се према овој асоцијацији подразумева: "уређај помоћу којег се могу одређени објекти на жељени начин померати, користити без додира руку".

Под појмом робот се према истој асоцијацији подразумева: "механички систем чије функције кретања одговарају живом организму и које су комбиноване вољом интелигенције човека. Да би се исти сматрали интелигентним системима, то јест да њихова способност приближно одговара интелигенцији човека, потребно је да задовољавају најмање једну од следећих карактеристика: моћ мишљења, способност опажања, способност прилагођавања и способност учења."

Код поделе роботских система на основу уношења информација или приступа са становишта научних метода, разликују се следећи појмови:

МАНУЕЛНИ МАНИПУЛАТОР: човек директно управља манипулатором;

СЕКВЕНЦИЈАЛНИ РОБОТ: то су манипулатори који захтевају одређену процедуру, тј. њихово управљање и позиционирање обрађује се секвенцијално, односно корак по корак;

РОБОТ СА ЧВРСТОМ СЛЕДЉИВОШЋУ: дефинишу се као секвенцијални роботи, само с том разликом што се улазне информације не могу мењати;

РОБОТИ СА ПРОМЕНЉИВОМ СЛЕДЉИВОШЋУ: дефинишу се такође као секвенцијални роботи али се улазне информације могу мењати;

НУМЕРИЧКИ УПРАВЉАНИ РОБОТИ: су роботи који наредбодавне информације добијају преко одговарајућих нумеричких операција;

ИНТЕЛИГЕНТНИ РОБОТИ: су роботи који се темеље на сазнању, искуству и способности опажања растојања и елемената око себе.

Од настанка првих роботских система до данас, дефинисане су четири генерације робота. Обележјем роботске генерације сматра се сложеност информатичког система робота и сензорских података.

Роботи нулте генерације су били са тзв. чврстим програмом, боље речено нису могли да се репрограмирају, нису имали програмски управљачки део, то су у ствари механичке руке. Робот је радио само посао за који је био направљен до краја свог радног века, као део неког технолошког процеса. Углавном се примењују у масовној производњи као замена за мануелни рад.

Роботи I генерације или програмски роботи имају могућност управљања са сваким степеном слободе кретања (имају независан погонски систем за сваки зглоб). После програмирања робот понавља један те исти чврсти програм (путању, захвате, ...). Ти роботи имају најнужнију сензорику и врло ограничену интелигенцију. Под појмом интелигенције имају само меморију у којој је складиштен програм. Уз ограничену интелигенцију и сензоре, знатно заостају у спретности и покретљивости у односу на човечију руку. Делотворно могу обављати само нискоквалификовани рад (обављање помоћних операција код пресовања, заваривања, алатних машина и сл.), па околина мора бити високоорганизована.

Роботи II генерације или адаптивни роботи имају могућност флексибилне измене програма кретања у сагласности са реалном ситуацијом, захваљујући уграђеним разним микропроцесорским системима (сензорима). Исти примају информације о стању околине од разних даваца, обрађују их и генеришу сигнал адаптивног управљања. У тим случајевима већ је реч о регулацији с повратном спрегом. Уз меморију ти роботи имају могућност доношења једноставне логичке одлуке: да или не.

Робот III генерације или интелигенти роботски системи се граниче са елементима вештачке интелигенције. Интелигентни роботски системи су опремљени осим системима за распознавање и рачунарима нове генерације. Цели систем има својства вишег степен интелигенције, тј. доношења одлуке у детерминисаним условима (анализа, учење и одлучивања у недетерминисаним условима синтеза). За вештачку интелигенцију је најбитнија могућност учења (повезивања нових искустава са постојећим знањем). То је могуће постићи моделом спољног окружења, који је уграђен у меморију рачунара. Поређењем са добијеним информацијама из спољног окружења, робот самостално реагује на спољне промене тј. доноси одлуке без програмског упутства.

За разлику од рачунара где нова генерација рачунара смењује стару, код робота су присутне све врсте и свака од њих има неку себи својствену примену.

Роботи нулте генерације су и данас прилично присутни, само су примењени код неких једноставних послова.

1.3 Подела роботских система

Разлог за све већу примену робота лежи у неколико следећих темељних основа:

- повећање продуктивности,
- смањење трошкова,

- савлађивање недостатака стручности човека (прецизност),
- побољшање квалитета производње,
- ослобађање човека од монотоних и понављајућих задатака или од рада у за човека опасној околини.

Роботски системи се могу поделити на:

- манипулационе роботске системе,
- мобилне роботске системе,
- информационо-управљачке роботске системе.

Мобилни роботски системи су платформе чијим кретањем управља аутоматски систем. Они имају програмирану путању кретања, а исто тако им је програмирано аутоматско одређење циља и намењени су за аутоматску доставу делова и алата машинама и од алатних машина до складишта. На овакве покретне системе могуће је поставити манипулациони механизам.

Информационо-управљачки роботски системи служе за сакупљање, обраду, пренос информација и за њихово коришћење при обликовању различитих управљачких сигнала. У производњи су то системи аутоматске контроле и управљања за производне процесе практично без људи, где се користе индустријски роботи. На пример у подводним условима то су апарати опремљени са мерно-информационим и управљачким уређајима и камером за одређивање особина дна и воде, за распознавање предмета, аутоматски приказ информација и слично.

Манипулациони роботски системи који се највише употребљавају у индустрији су:

- роботи,
- манипулатори,
- роботизовани технолошки системи.

Роботи се користе углавном у индустријској производњи, манипулатори у већини случајева су у употреби у условима где влада радијација, затрованост ваздуха, опасност од експлозије, висока и ниска температура. Роботизовани технолошки системи се примењују у условима сложених радова.

Начин управљања манипулационих роботских система може бити:

- аутоматски,
- даљински,
- ручни.

Аутоматски манипулациони уређаји (роботи, манипулатори, роботизовани технолошки системи) се деле у четири групе, сходно већ наведеној генерацијској подели робота: манипулатори са чврстим програмом, програмски манипулатори, адаптивни роботи, интелигентни роботи.

Даљинско управљани роботи и манипулатори (слика 1.1) се деле на шест типова:

- манипулатори са командним управљањем,
- копирајући манипулатори,
- полуаутоматски манипулатори,
- роботи са супервизорним управљањем,
- роботи са комбинованим управљањем,
- роботи са дијалогом (интерактивним) управљањем.

Манипулатори са командним управљањем се одликују тиме што оператор - човек притиском на одговарајуће команде даљински укључује извршне органе сваког зглоба манипулатора.

Копирајућим манипулатором, који се налази углавном у опасној зони, са одређене безбедне удаљености управља оператор - човек помоћу уређаја који је кинематски сличан радном манипулатору.

Полуаутоматски манипулатори су такви уређаји који на пулту оператора имају командни механизам у облику вишестепене управљачке палице, са које се електрични сигнали трансформишу помоћу специјализованог рачунара у управљачке сигнале манипулатора.

Карактеристика робота са супервизорним управљањем је у томе што оператор прати на даљину рад робота, који се налази у опасној зони и даје само појединачне команде циља, према чијим сигнаlima се укључују поједини програми аутоматског рада робота. Оператор врши само функцију препознавања околине и доношења одлуке.

Код робота са комбинованим управљањем врши се комбинација аутоматских режима управљања са режимима ручног управљања, као што је случај ког полуаутоматског или копирајућег манипулатора.

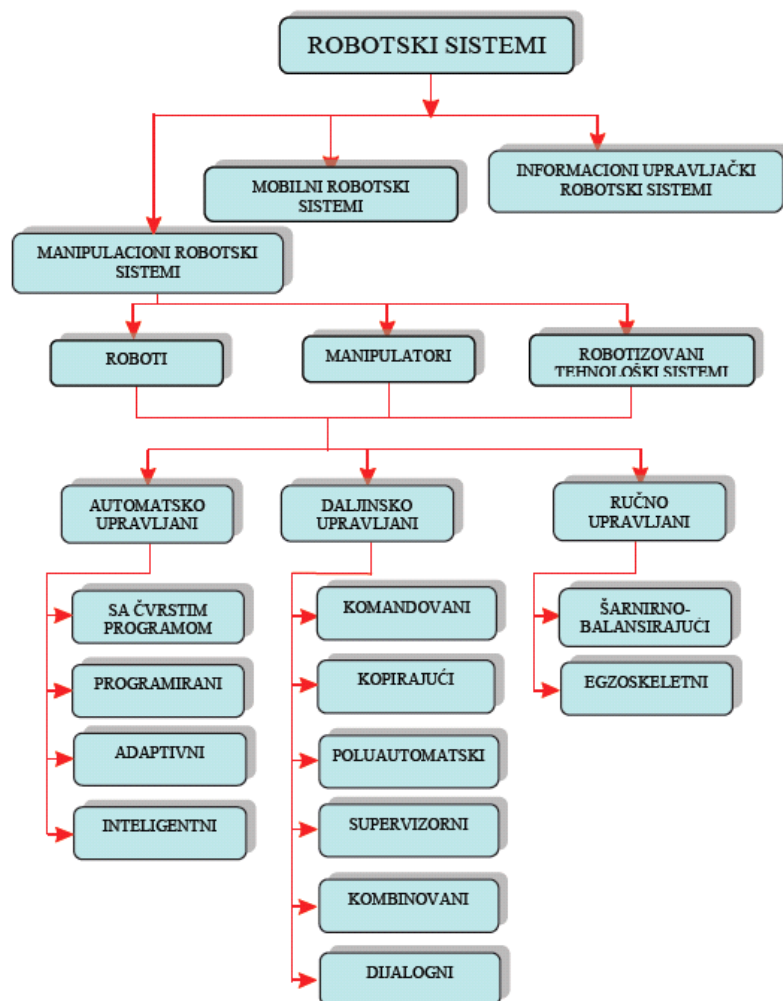
Роботи са дијалогом (интерактивним) управљањем су интелигентни и разликују се од супервизорних по томе што и сами активно учествују у препознавању ситуације и доношења одлука, при чему помажу оператору од којег примају команде.

Ручно управљани роботи се деле на два типа:

- шарнирно-балансирајући,
- егзоскелетни.

Шарнирно-балансирајући робот представља вишечлани механизам са погонима у сваком зглобу. Погодни су при утоварно-истоварним радовима са теретима већих тежина.

Егзоскелетни роботи су вишечлани механизми чији су чланци повезани непосредно са рукама или ногама човека. Покрети човека формирају управљачке сигнале. Примењују се за појачање снаге екстремитета и тела човека (како здравог тако и хендикепираног).



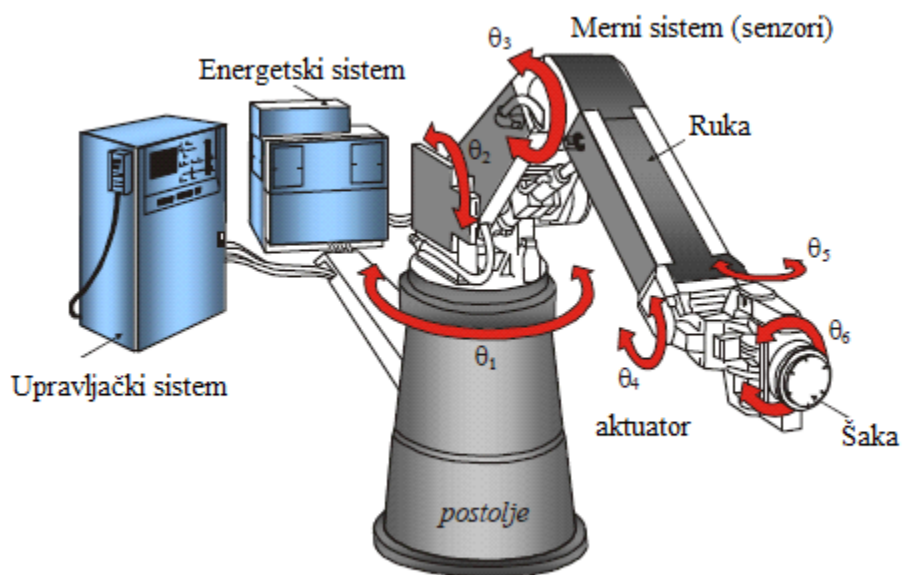
Слика 1.1. Општа класификација индустријских роботских система [1]

2.0 Модел робота

2.1 Основни појмови

Индустријски робот је уређај који се користи за послове материјала на бази управљања. Сама конструкција робота (слика 2.1) садржи следеће неопходне системе:

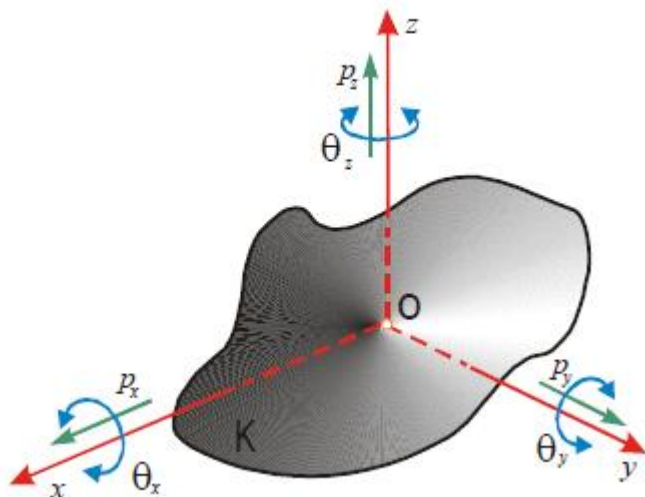
- механички систем,
- енергетски систем,
- мерни систем,
- управљачки систем.



Слика 2.1. Приказ индустријског робота [1]

Кинематска одређеност робота подразумева одређеност позиције и оријентације завршног уређаја (*eng. effector*) у односу на предмете у радном простору робота (манипулатора), као и у односу на неки непомицни референтни координатни систем. С друге стране, положај робота је одређен релативним угловним закретањем односно релативним транслаторним померањем у зглобовима робота. Да би робот обавио исправно радни задатак, у сваком тренутку морају бити одређени позиција и оријентација хватаљке у простору.

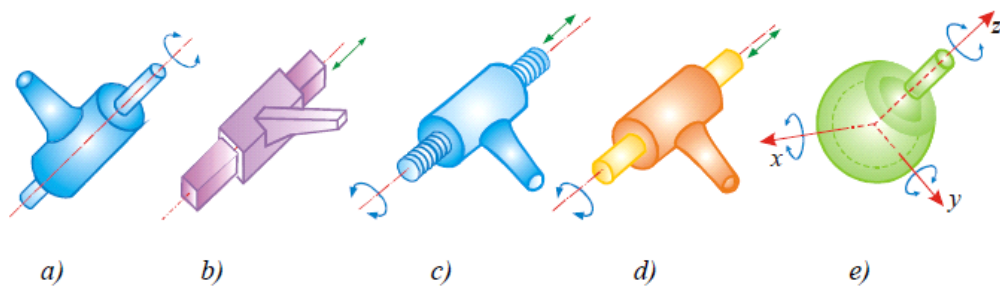
Као што је познато, положај тела у простору одређен је са шест независних параметара, три translације и три ротације, дакле има шест степени слободе кретања: $\phi = 6$. Другим речима, оно се може кретати на шест различитих, независних начина: транслаторно за величину p_x, p_y, p_z , дуж оса x, y, z чиме је могуће постићи позиционирање тачке тела у простору и ротационо око све три осе за вредност углова $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ како је приказано на слици 2.2.



Слика 2.2. Кретање тела у простору [1]

Ако се међусобно повежу два тела, од којих је барем једно покретно, онда се каже да они чине зглоб, односно кинематски пар. Настајањем зглоба долази до смањења могућности кретања, па је и степен слободе кретања мањи тј. $\phi < 6$.

Постоје различите конструкције зглобова, а неколико простијих је приказано на слици 2.3.



Слика 2.3. Врсте зглобова: а) ротациони, б) транслаторни, ц) вијчани, д) ваљкасти е) кугласти[1]

На горњој слици је дат пример пасивних зглобова (немају покретачке погоне) са различитим степенима слободе кретања и то:

а) ротациони зглоб који има релативно обртање само око једне осе и његов степен слободе кретања је $\phi = 1$;

б) транслаторни зглоб има релативно померање дуж једне осе, и код њега је $\phi = 1$;

ц) вијчани зглоб има везано обртање око осе и translацију дуж исте осе, што значи да је кретање зглоба хеликоидеално (у облику завојнице), па је $\phi = 1$;

д) ваљкасти зглоб, код којег постоји обртање и транслаторно померање цилиндра унутар шупљег цилиндра, при чему је $\phi = 2$;

е) кугласти зглоб има три степена слободе кретања $\phi = 3$, јер су могућа три независна релативна обртања кугле унутар шупље кугле.

Крутост односно отпор према сваком непожељном кретању је основно мерило квалитета једног зглоба. Из овог произилази да је добро да зглобови имају што нижи степен слободе кретања.

Основним зглобовима се сматрају ротациони зглоб и транслаторни зглоб, који имају $\phi = 1$ степен слободе кретања, док се сви остали зглобови са $\phi > 1$ свде на ова два зглоба. Ротациони зглобови обезбеђују ротационо кретање једног сегмента (чланка) у односу на други и могу бити изведени у две варијанте: стубној (стожастој) и шаркастој.

Транслаторни зглобови обезбеђују транслаторно померање једног чланка у односу на претходни чланак. Могу бити изведени у попречној и телескопској варијанти (слика 2.4.).



а) ротацијски зглоб

б) транслаторни зглоб

Слика 2.4. Шематски приказ основних зглобова [1]

Варијанте ротационих и транслаторних зглобова су приказане у табели 2.1, у којој су према VDI (Немачка), прописане ознаке и симболи за индустријске роботе.

Табела 2.1. VDI- симболи за индустријске роботе [1]

Naziv	Symbol	Primer
Translatorni teleskopski zglob		
Translatorni poprečni zglob		
Translatorno rešenje ose		
Rotacioni stubni (stožasti) zglob		
Rotacioni šarkasti zglob		

У следећој табели је дат приказ кинематских парова, који су на основу начина везивања, разврстани у одређене класе.

Табела 2.2. Изглед кинематских парова [1]

Klasa kinematskog para	Broj stepeni slobode kretanja f	Prikaz kinematskog para
<i>I klasa</i>	$f=5$ <i>3 rotacije + 2 translacije</i>	
<i>II klasa</i>	$f=4$ <i>3 rotacije + 1 translacije</i>	
<i>III klasa</i>	$f=3$ a) <i>3 rotacije + 0 translacija</i> b) <i>1 rotacija + 2 translacije</i>	
<i>IV klasa</i>	$f=2$ <i>1 rotacija + 1 translacija</i>	
<i>V klasa</i>	$f=1$ a) <i>0 rotacija + 1 translacija</i> b) <i>1 rotacija + 0 translacija</i>	

За примену у роботизи најважнији су кинематски парови пете класе. Кинематски пар пете класе дозвољава само једну ротацију (ротациони пар), односно само једну транслацију (транслаторни пар).

2.2 Кинематски ланци

Кинематска структура робота представља у ствари кинематски ланац. Кинематски ланац је скуп од n -повезаних кинематских парова (два суседна чланка механизма међусобно повезана зглобном везом).

Конфигурација индустријског робота се састоји од n деформабилних тела који представљају сегменте (енгл. линк) који су међусобно повезани зглобовима (енгл. јоинт). Сваки зглоб има један степен слободе кретања. Већина робота, односно манипулатора има ротационе или транслаторне зглобне везе.

У зависности од структуре веза које су остварене у кинематском ланцу, разликују се:

- прости и
- сложени кинематски ланци.

Ланац код ког сваки чланак у низу има два зглоба, претходни и наредни, назива се простим кинематским ланцем (сл.2.5.а и сл.2.5.б).

Сложени кинематски ланац је онај код којег бар један чланак ланца има три или више зглобова (један претходни и два или више наредних), што знач да се ланац грана (сл.2.5.д).

Према другој подели кинематски ланци могу бити:

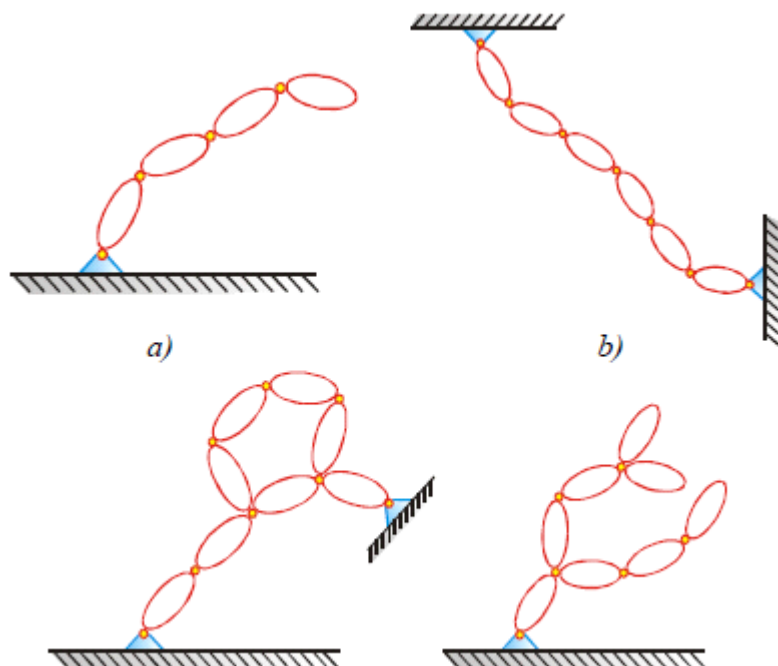
- отворени и
- затворени кинематски ланци.

Отворени ланци су они код којих не постоји затворени низ (из једне тачке ланца у другу се може доћи само једним путем). Код отвореног кинематског ланца почетни чланак је везан за чврсту подлогу, док задњи чланак у ланцу носи завршни уређај. С обзиром да сваки зглоб има један степен слободе кретања ($\phi = 1$), цели кинематски ланац ће тада имати:

$$\phi_L = n \cdot \phi = n \cdot 1 = n \quad (2.1)[1].$$

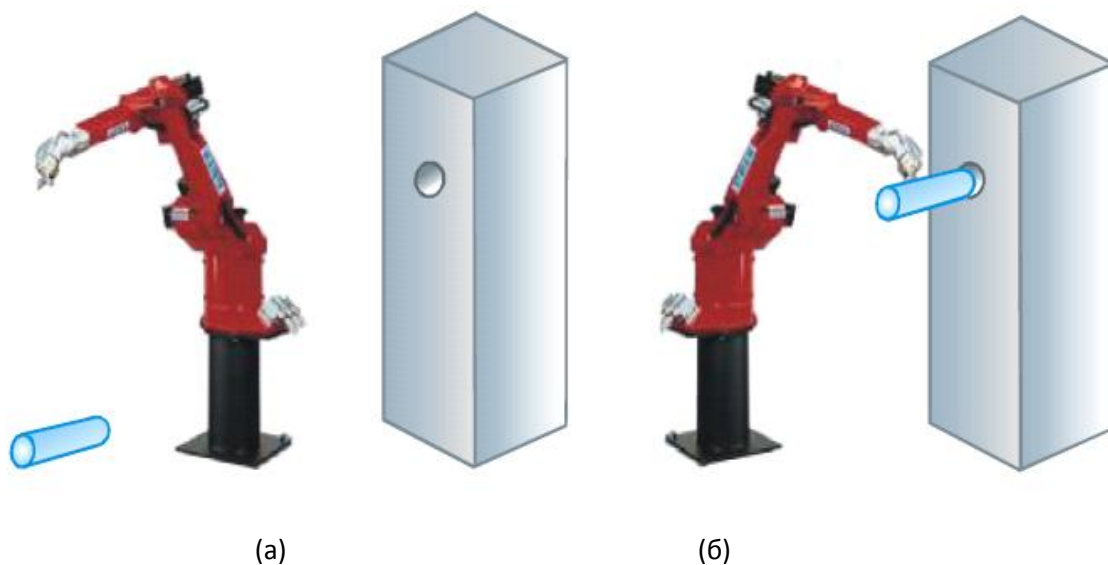
степен слободе кретања, при чему је n број зглобова.

Затворени ланац има најмање један затворени низ чланака, где се из једне тачке тог низа може доћи бар на два начина (сл.2.5.ц).



Слика 2.5. Типови кинематских ланаца: а) отворени, прост ланац; б) затворени, прост ланац; ц) затворени, сложен ланац; д) сложен, отворен ланац. [1].

За роботске механизме карактеристично је да током рада кинематски ланац мења своју структуру и то од отворене ка затвореној и обратно. Такав један пример је приказан у поступку монтаже (сл.2.6.), где робот у фази преноса радног предмета (фаза а) представља отворен ланац, а затворен ланац је у фази монтаже (уметања) предмета у отвор (фаза б).



Слика 2.6. Приказ промене кинематске структуре робота у поступку монтаже. [1]

У анализи, синтези и управљању роботима изузетан значај има кинематско описивање робота као отвореног кинематског ланца. Код зглобног кинематског ланца број степени слободe је једнак броју независних параметара који су потребни да би се једнозначно одредио положај целог ланца.

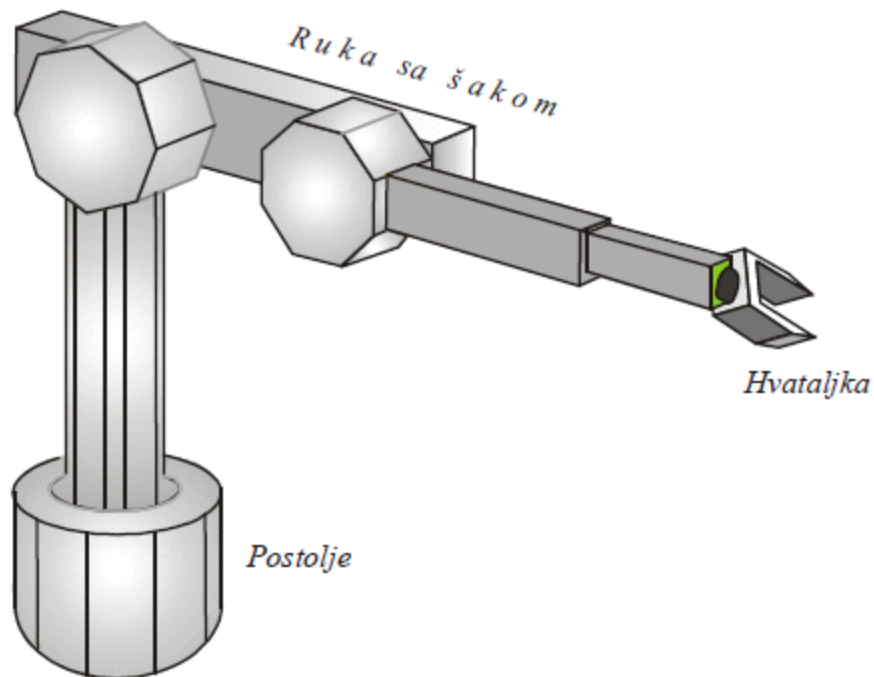
Да би се дефинисао положај код једног отвореног кинематског ланца, потребно је да се зна померање у свим зглобовима ланца, тј. потребно је знати за коју вредност угла је заротиран сваки ротациони зглоб и колико је померање у сваком транслаторном зглобу.

Код оваквих ланаца зглобови су међусобно независни и померања у зглобовим могу бити произвољна. Број степени слободe код отворених кинематских ланаца је једнак броју зглобова.

2.3. Структура индустријских робота

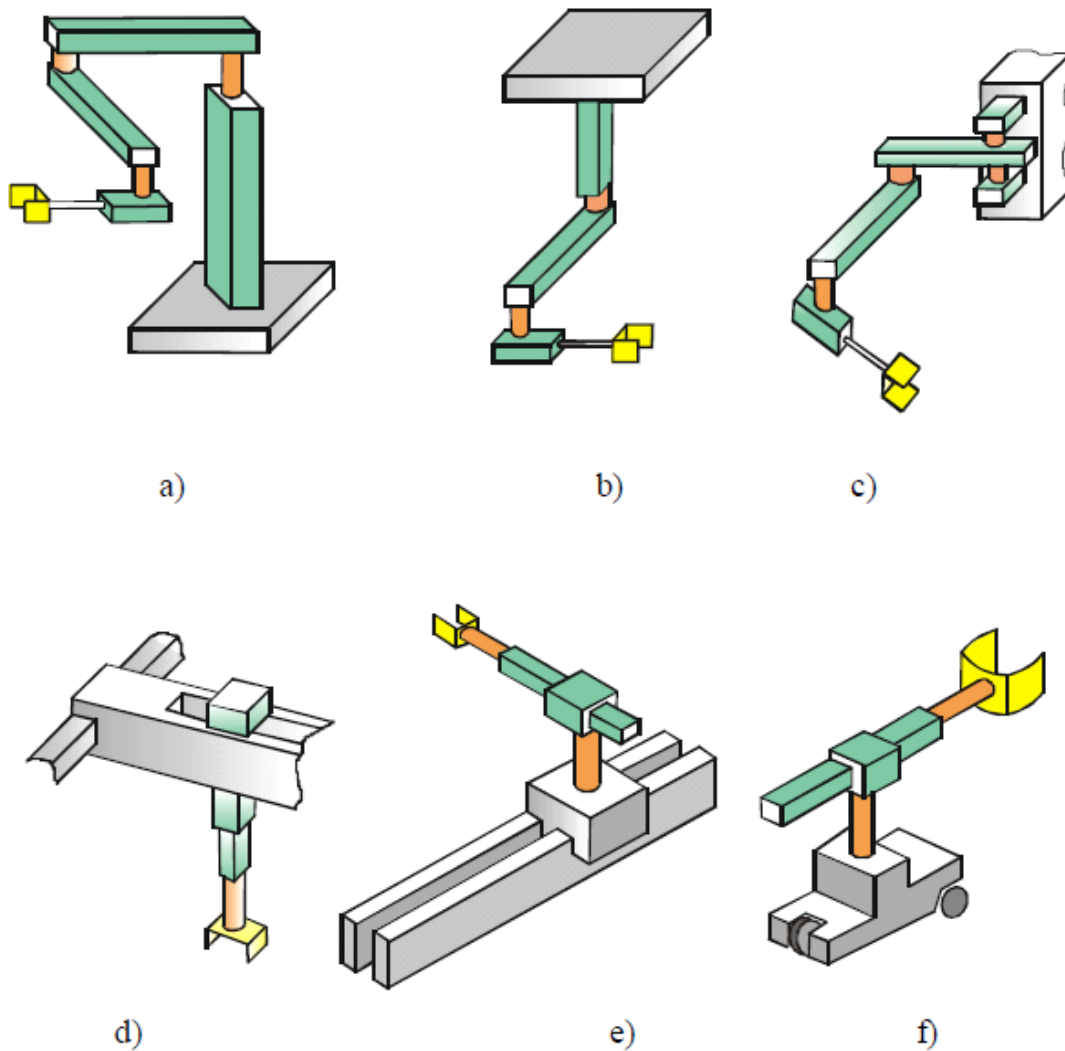
Механички део индустријског робота се може поделити на следеће подсистеме (слика 2.10):

- постоље или база робота;
- рука и шака робота;
- завршни уређај робота (*енгл. end effector*), која може да буде у виду хватаље, сензора или алата.



Слика 2.10. Приказ механичких подсистема индустријског робота [1]

Извршни механизам индустријског робота представља систем покретно повезаних сегмената механичког система, намењених за манипулисање радним објектом. Извршни механизам који осигурава транспортна и оријентациона кретања назива се руком робота. Ако су сегменти извршног механизма индустријског робота међусобно повезани само ротационим кинематским паровима, у том случају ти сегменти заједно образују руку зглобног типа (зглобну руку). Постоље робота је слично постољу алатног уређаја, где основна плоча може бити ливена или заварена од челичних профила. Постоље робота може бити изведено портално, конзолно и учвршћено на под, зид или платформу (слика 2.11.). Код одабира врсте постоља важну улогу има специфичност задатка коју робот треба да обавља. У случају да је постоље покретно, тад се говори о подвозу робота који може бити на шинама или на колицима. На постољу је смештен први ротациони или транслаторни зглоб, као и мотори, цилиндри, уљни и остали агрегати.



Слика 2.11. Типови постоља и подвоза: а) стајаће, б) плафонско, ц) зидно, д) портално постоље, е) подвоз у облику шина, ф) подвоз у облику колица [1]

За постоље робота је везана рука робота на којој се серијски надовезује корен шаке робота, који са констукционог становишта чине једну целину. Завршни механизам се састоји од сложеног дела шаке (један до три степана слободе)и завршног уређаја. Задатак руке робота и завршног механизма је да воде завршни уређај на основу предвиђеног управљачког алгоритма. Због чега се још назива системом вођења завршног уређаја.

Завршни уређај је самостална јединица која се надовезује на корен шаке и у директној је вези између предмета над којим се врши одговарајућа операција и кинематске структуре самог робота.

Завршни уређај робота се сврстава у групу изменљивих елемената индустријских робота. Индустријски роботи се опремају оговарајућом завршним уређајем у зависности од конкретног задатка. Завршни уређај може деловати као хватаљка на роботу за послуживање и монтажу, може бити алатка технолошког робота или сензор мерних робота. Најпознатија њена примена је у улози хватаљке и у тој функцији се робот битно разликује од осталих машина. Још увек не постоји решење хватаљке која ће имати општу намену већ се пројектују специфична решења за посебне намене. При изради и одабиру конструкције хватаљке морају се дефинисати захтеви општег карактера и специјални захтеви:

- карактеристике роботске руке са дозвољеном тежином хватаљке и предмета;
- карактеристике манипулационог предмета, нпр. тежина, крутост, материјал, геометрија, положај за време рада...;
- услови рада хватаљке (могућност брзе замене, прилагодљивост променама предмета манипулације);
- услови околине (температура, влажност, смештај робота).

Хватаљке се према врсти предмета који се хватају деле на:

- а) механичка клешта,
- б) механички прсти,
- ц) пнеуматска хватаљка,
- д) вакуумска хватаљка,
- е) магнетна хватаљка.

Према прихватном дејству хватаљке могу бити:

- једностране (магнетска, вакуумска и пнеуматска);
- двостране (механичка клешта);
- многостране (механички прсти).

Најчешћа врста хватаљке су механичка клешта. Оваква хватаљка се састоји од две чељусти који се обично крећу симетрично, а покреће их исти погон. Постоји више конструктивних решења у зависности од броја цилиндара. Механичка клешта имају један степен слободе кретања (овај степен слободе кретања се не убраја у укупни степен слободе кретања робота).

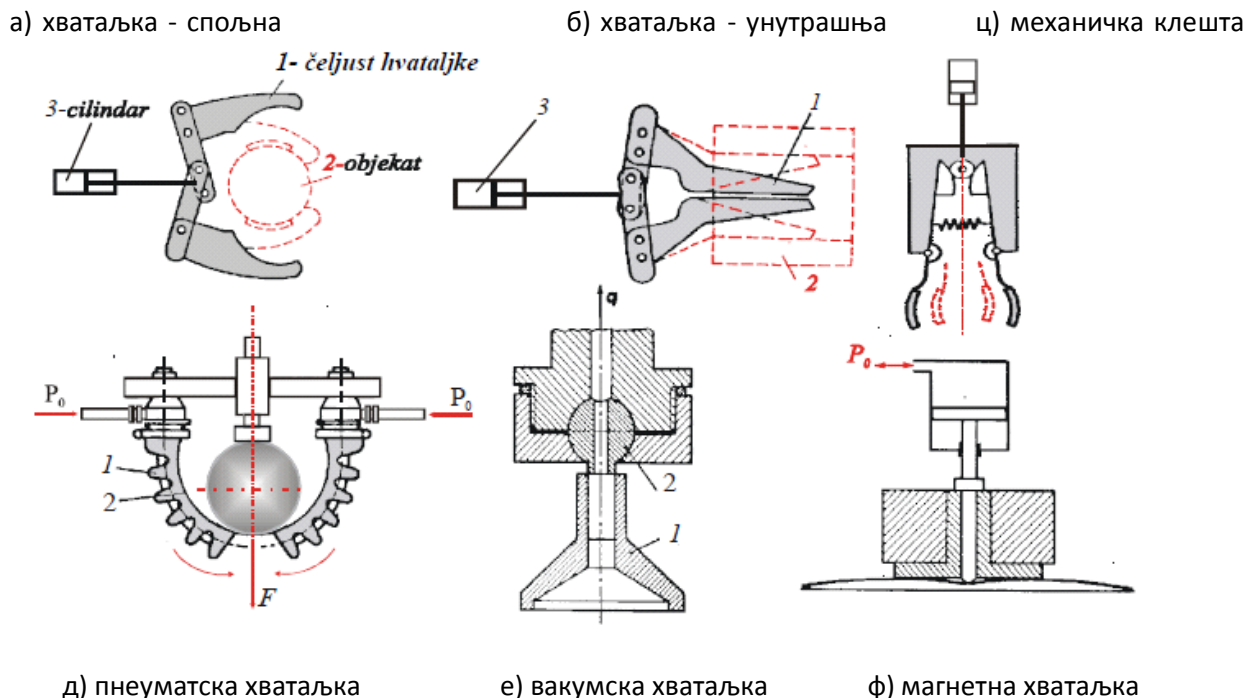
Механички прсти представљају хватаљку чији су чланци зглобно повезани и већином су опремљени са три до пет прстију. Због своје сложености ова врста хватаљке се мало примењује за индустријске роботе.

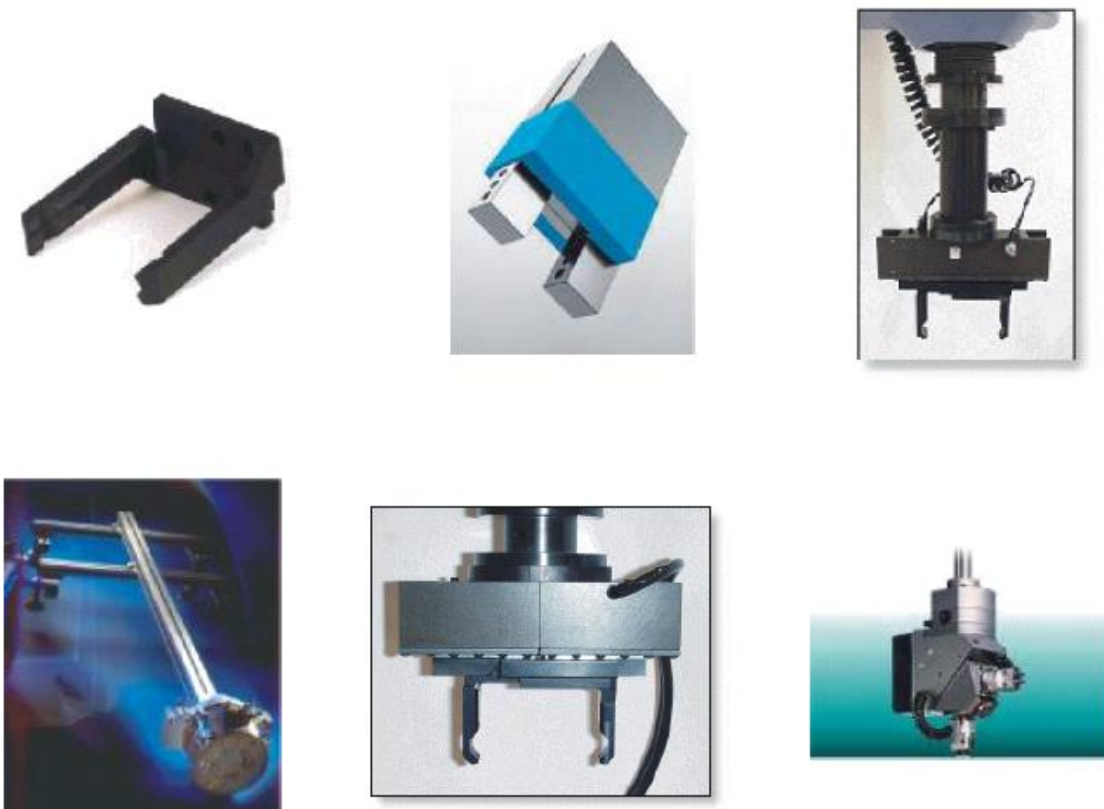
Пнеуматска хватаљка, приказана на слици 2.12д, има два прста састављена од еластичног црева подељеног на коморе (1), које је причвршћено на челичну траку (2). Уз потиснути притисак P_0 црево се савија у смеру приказаном стрелицама и на тај начин обухвата жељени предмет. Пнеуматска хватаљка је попустљива и прилагодива различитим облицима предмета.

Вакуумска хватаљка је једноставне израде и не захтева тешке погоне, али јој је потребно одређено време за постизање вакуума, те се при самом отпуштању мора повести притисак. Површине предмета којим се манипулише морају бити суве, глатке и чисте.

Магнетска хватаљка састоји се од перманентног магнета или електромагнета који остварује силу привлачења магнетских материјала (слика 2.12.ф). Ова хватаљка је једноставне конструкције, а основни недостатак јој је што при нестанку електричне енергије нема привлачне силе.

На слици 2.12 приказане су најчешће конструкције хватаљке. [1]





Слика 2.12 Различите врсте хватаљки [1]

На основу наведеног, може се рећи да је намена хватаљки преношење објекта из почетне у крајњу позицију и реоријентација истог у манипулационом простору.

Хватаљка мора да има могућност:

- прихватања објекта;
- контролисања оријентације објекта током преноса;
- "осећаја" положаја објекта у односу на хватаљку.

У зависности од намене робота зависи и избор саме хватаљке. Ако се мења намена робота, промениће му се само завршни уређаји (хватаљка), што је и потврда флексибилности робота као елемента производног система.

3.0 Радни простор

3.1 Геометрија радног простора

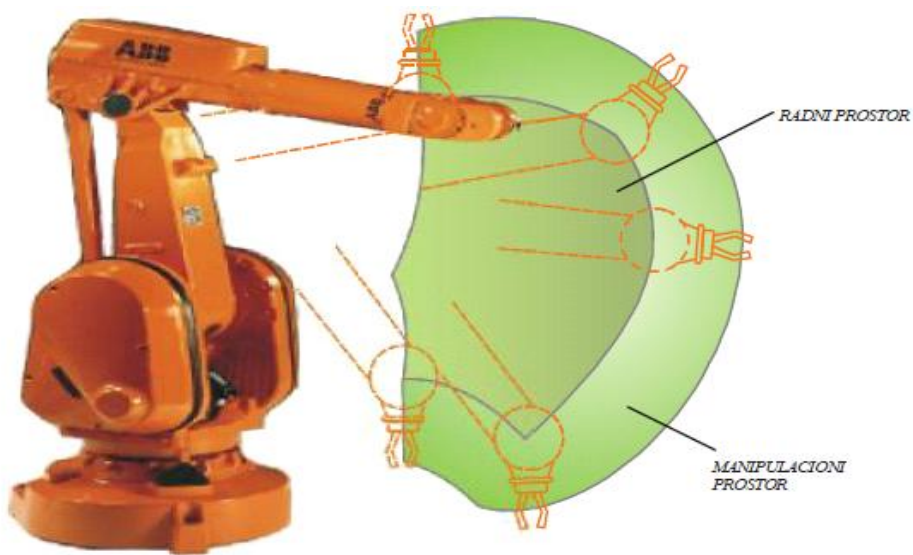
На основу дефиниције минималне конфигурације робота могуће је одредити и његов манипулациони простор. Манипулациони простор је скуп тачака у који робот може довести прохватницу (центар прихвата, врх алата и друго), односно обавити радни задатак како је приказано на слици 3.1. Изван манипулационог простора робот не може обављати задате задатке.

Радни простор чине само оне тачке манипулационог простора које робот може достићи уз произвољну оријентацију. Другим речима, радни простор је простор у којем је могућ захват и свих смерова, док у преосталом манипулационом простору је могуће извести захват само под одређеним углом. Радни и манипулациони простор су одређени кинематском структуром и геометријом кинематских парова робота, те ограничењем постављеним на поједине степене слободе кретања појединих зглобова. То значи да ће о типу и броју зглобова, затим дужини чланака, постојећим физичким ограничењима, а која су непосредно повезана са конкретном грађом и изгледом робота зависити и величина радног простора.

С обзиром да осе прва три зглоба робота одређују положај ручног зглоба, а осе преостала три зглоба одређују оријентацију алата, то и типови зглобова употребљених за прве три осе одређују и геометрију радног простора робота.

Колизијским простором се назива онај део манипулационог и радног простора који припада групи од два или више робота и у којем може доћи до судара (колизије).

Радни простор може бити уређен или не уређен. Радни простор се сматра уређеним, ако је прописан положај и оријентација обратка и ако нема препрека у радном простору. Што је радни простор уређенији то су захтеви за нивоом интелигенције робота нижи.

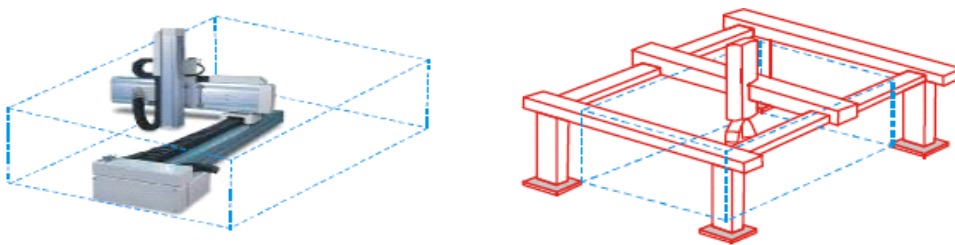


Слика 3.1. Радни и манипулациони простор робота [1]

Комбинујући међусобно ротацијске (Р) и транслаторне (Т) зглобове за прве три осе одређује се и следећа конфигурација робота:

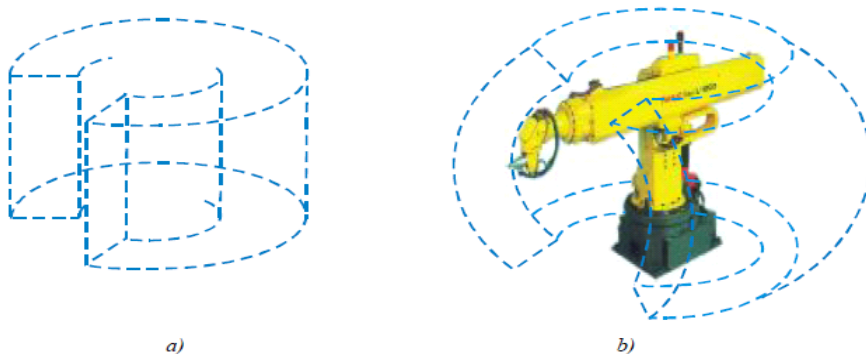
1. правоугаона или ТТТ;
2. цилиндрична или РТТ;
3. сферна или РРТ;
4. ротацијска или РРР;
5. робот типа СЦАРА - РТР, ТРР или РРТ структуре.

Одређени примери манипулационих простора за карактеристичне структуре робота су приказани на следећим сликама. На слици 3.2. приказана су два типа робота (конзолни и портални) са правоугаоном (engl. *Cartesian*) конфигурацијом или ТТТ, код ког је радни простор у облику призме.



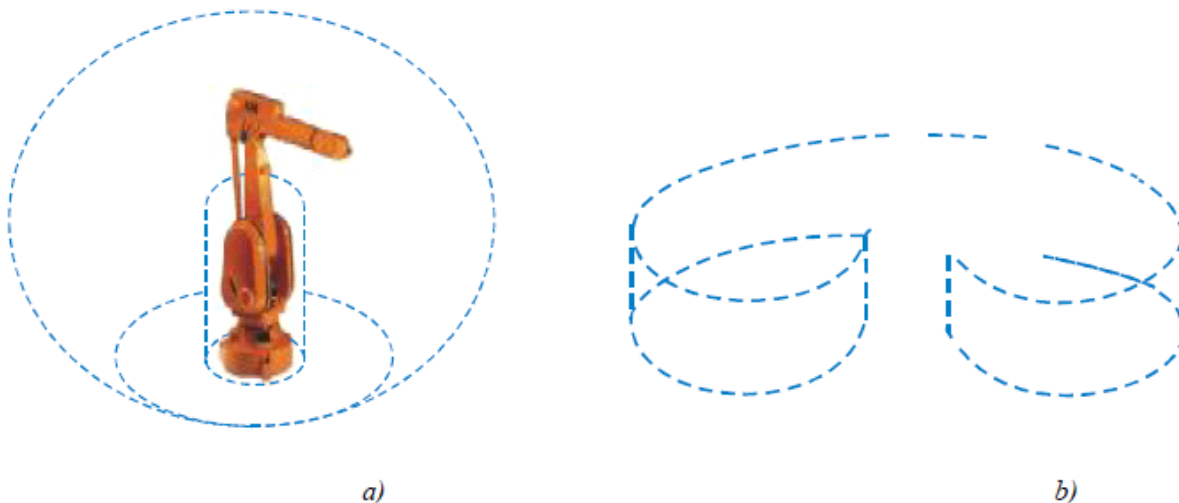
Слика 3.2. Приказ манипулационог простора руке робота ТТТ [1]

Ако се први зглоб код правоугаоне конфигурације робота замени ротацијским зглобом, тада се добија робот цилиндричне (engl. *cylindrical*) конфигурације (РТТ), слика 3.3.а. Радни простор таквог робота је због ограничености транслаторног кретања једнак запремини између два вертикална, концентрична плашта ваљака. Роботи овакве конфигурације се користе за опслуживање алатних машина.



Слика 3.3. Приказ различитих манипулационих простора: а) робот РТТ конфигурације; б) робот РРТ конфигурације. [1]

Замени ли се други зглоб цилиндричне конфигурације робота са ротацијским зглобом, добија се робот сферне (engl. *spherical*) конфигурације (РРТ), приказан на слици 3.3.б. Радни простор тог типа робота је, у случају да постоји ограничење транслаторног кретања, радни простор је део запремине између две концентричне сфере. У случају да постоји ограничење свих кретања, радни простор је део запремине између две концентричне сфере. Роботи овакве структуре имају велику флексибилност у приступу одређеној локацији и примењују се за тачкасто заваривање и опслуживање алатних машина.



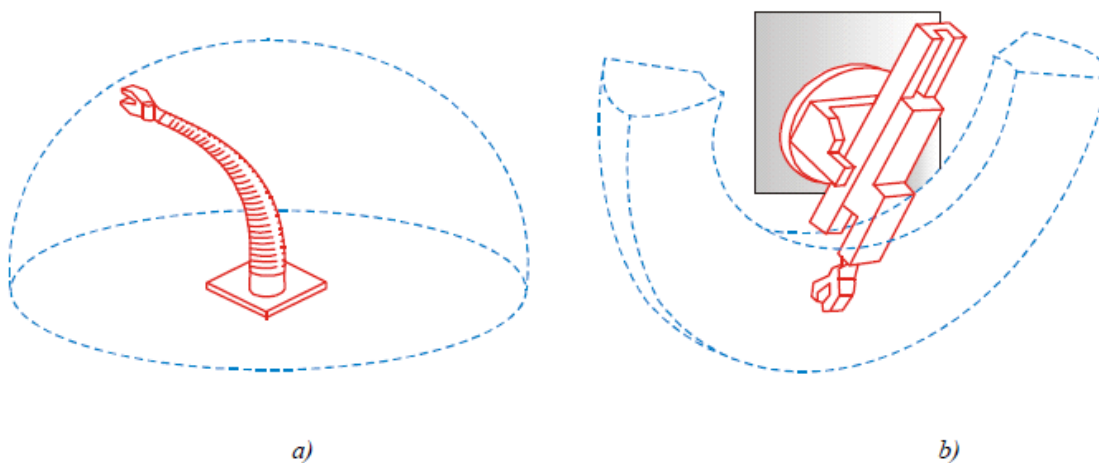
Слика 3.4. Приказ манипулационог простора: а) робот РРР структуре,
б) робот типа SCARA.[1]

На слици 3.4.а је приказ робота ротационе конфигурације (PPP) код које су сва три зглоба ротациона. Ова конфигурација се још назива револутна, лактаста, антропоморфна или зглобна. Код ове врсте робота радни простор је кугла и то за случај да не постоје ограничења ротационих кретања. Када постоје ограничења у кретању, радни простор је део кугле сложеног облика чији је пресек са стране најчешће у облику полумесеца.

Робот типа *SCARA* (engl. *Selected Compliance Assembly Robot Arm*) има особине зглобних и цилиндричних робота, ознака његове структуре је PPP - Р и све ротације му се налазе у хоризонталној равни (сл.3.4.б).

Уз ове типичне конфигурације робота примењују се и роботи неконвенционалне структуре.

Пример таквог робота је дат на слици 3.5.



Слика 3.5. Приказ манипулационог простора:

а) робота типа *Spine*;

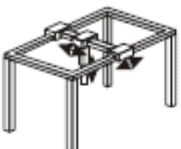
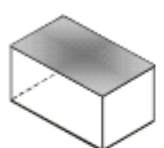
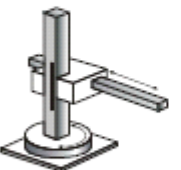
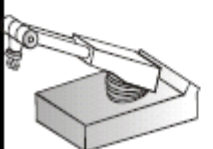
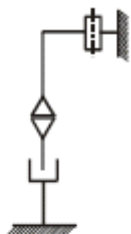
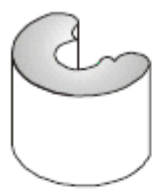
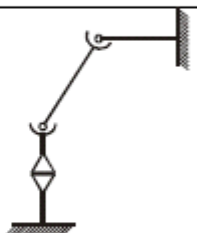
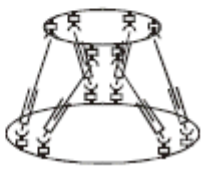
б) робота конфигурације клатна. [1]

Слика 3.5.а даје приказ робота типа *Spine* чија је рука сасвим гипка (подсећа на сурлу слона) и радни простор му је ефикасно искоришћен. Било којој тачки сфероидног манипулационог простора може се прићи из било којег смера па чак и са задње стране, па је погодан за рад на тешко приступачним местима (нпр. бојење унутрашњости аутокаросерије).

Други тип робота приказан на слици 3.5.б је конфигурација клатна чији је радни простор у облику потковице. Овај тип робота, који се може монтирати и на зид, је могуће користити за радове на местима где се уобичајене роботске конфигурације не могу употребљавати.

У следећој табели приказане су типичне конфигурације робота према ИСО 9506 - 3.

Табела 3.1. Типичне минималне конфигурације робота на основу ИСО 9506 - 3 стандарда [1]

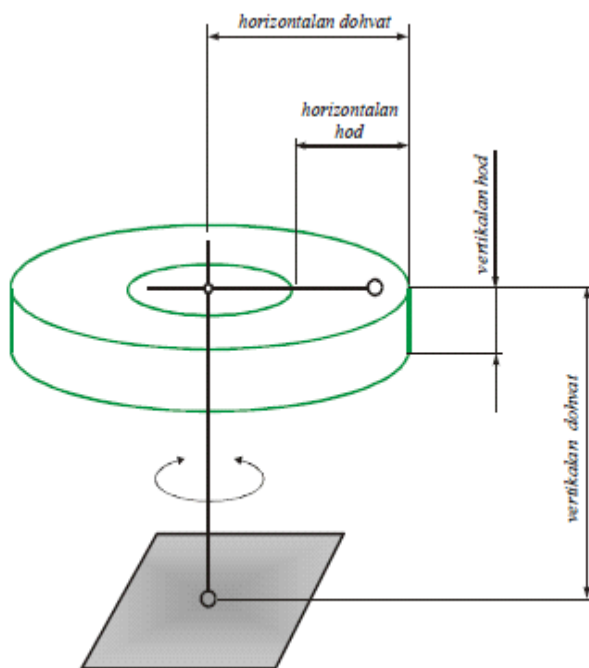
Vrsta robota	Kinematska struktura	Radni prostor	Primer - fotografija robota
Pravougaoni robot 	$3 T$ 		
Cilindrični robot 	$2 T$ $1 R$ 		
Sferni robot 	$1 T$ $2 R$ 		
SCARA robot 	$2 T$ $1 R$ 		
Zglobni robot 	$3 R$ 		
Paralelni robot 			

Величину радног простора робота је могуће приближно одредити помоћу дохвата и хода. Хоризонтални дохват је максимална удаљеност коју ручни зглоб може досегнути. Мери се од вертикалне осе око које робот ротира.

Хоризонталан ход представља укупну удаљеност од вертикалне осе по којој се ручни зглоб може кретати. Разлика између хоризонталног дохвата и хода је минимална удаљеност ручног зглоба од главне вертикалне осе. С обзиром да је та величина позната, тада је дохват увек већи или једнак ходу.

Вертикалан дохват робота представља максималну удаљеност ручног зглоба робота од базе. Вертикалан ход робота је укупна вертикална удаљеност по којој се ручни зглоб може кретати и мањи је или једнак вертикалном дохвату.

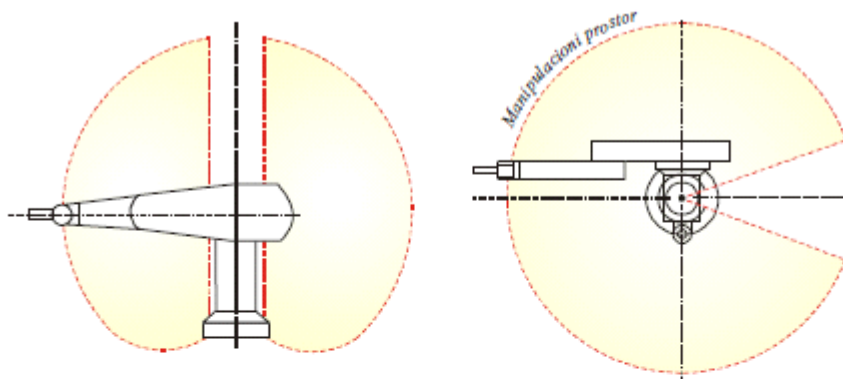
На слици 3.6. је дат приказ дохвата и хода једног цилиндричног робота. Са приказане слике се види да је хоризонтални дохват робота цилиндричне конфигурације полупречник спољног плашта (омотача) ваљка радног простора, а да је хоризонталан ход разлика полупречника спољашњег и унутрашњег ваљка.



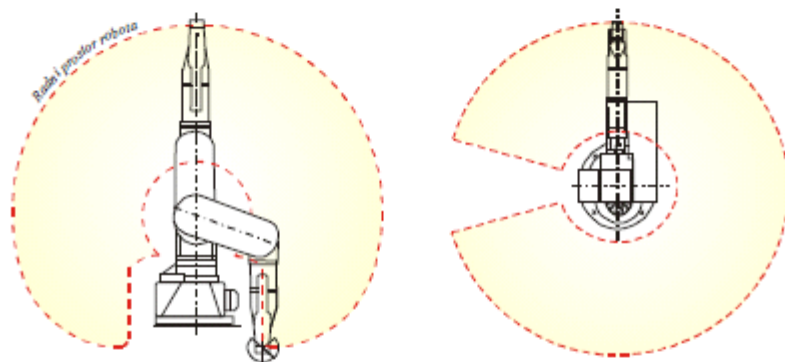
Слика 3.6. Дохват и ход цилиндричног робота[1]

Вертикални дохват цилиндричног робота ће бити већи од његовог вертикалног хода ако се помоћу ограничења у кретању другом осом, ручном зглобу не допусти досезање границе радног простора. Код ротационих робота дохват је често једнак ходу, на основу чега је њихов радни простор пун.

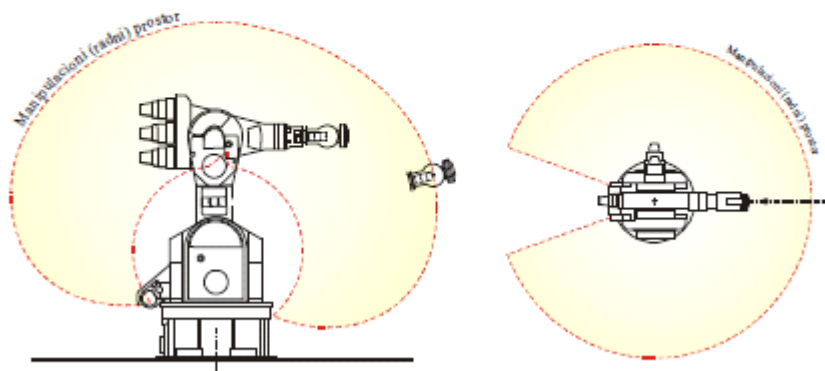
На следећим сликама приказани су примери манипулационих простора за различите врсте индустријских робота. [1]



Slika 3.7. Ravanski prikaz manipulacionog prostora robota PUMA 500



Slika 3.8. Ravanski prikaz manipulacionog prostora robota MANUTEC r3



Slika 3.9. Ravanski prikaz manipulacionog prostora robota KUKA IR

161/15.0

Слике (3.7, 3.8 и 3.9). Равански прикази манипулационих простора индустријских робота.[1]

4.0 Кинематика робота

4.1 Опште теоријске поставке директне кинематике

Робот се може моделирати као ланац крутих тела - чланова, међусобно повезаних зглобовима, где се на почетку ланца налази непомична база робота, а на крају ланца је завршни уређај (прихватница). Да би се робот кретао у тродимензионалном простору, где обавља одређене задатке, потребно је управљати позицијом и оријентацијом прихватнице. Због тога је неопходно одредити везу између параметара зглобова робота те позиције и оријентације прихватнице.

У свету постоје два основна приступа у описивању кинематике робота, а то су:

1. *Denavit - Hartenbergov* аналитички приступ;
2. Нумерички приступ на бази *Rodriguesove* формуле.

Ова два приступа су идентична по својој комплексности за случај када се главне осе инерције поклапају са осама зглобова и заједничком нормалом, што је честа појава код индустријских робота.

Demavit - Hartenbergov приступ је погоднији када се формирају кинематичке једначине робота, а приступ помоћу Родригуесове формуле је прикладнији за формирање динамичких једначина робота.

Demavit - Hartenbergov приступ се заснива на хомогеним трансформацијама, које дефинишу положај и оријентацију једног координатног система у односу на други. У вези са позиционирањем робота појављује се проблем на који начин се задаје жељена позиција робота. Разликују се два начина за давања координата робота:

- а) преко тзв. унутрашњих координата робота (односно координата зглобова) и
- б) преко тзв. спољашњих координата робота.

4.2 Појам спољашњих и унутрашњих координата

Под унутрашњим координатама једног робота подразумевају се скаларне величине, које описују релативни положај једног члана (сегмента) у односу на други члан кинематског пара.

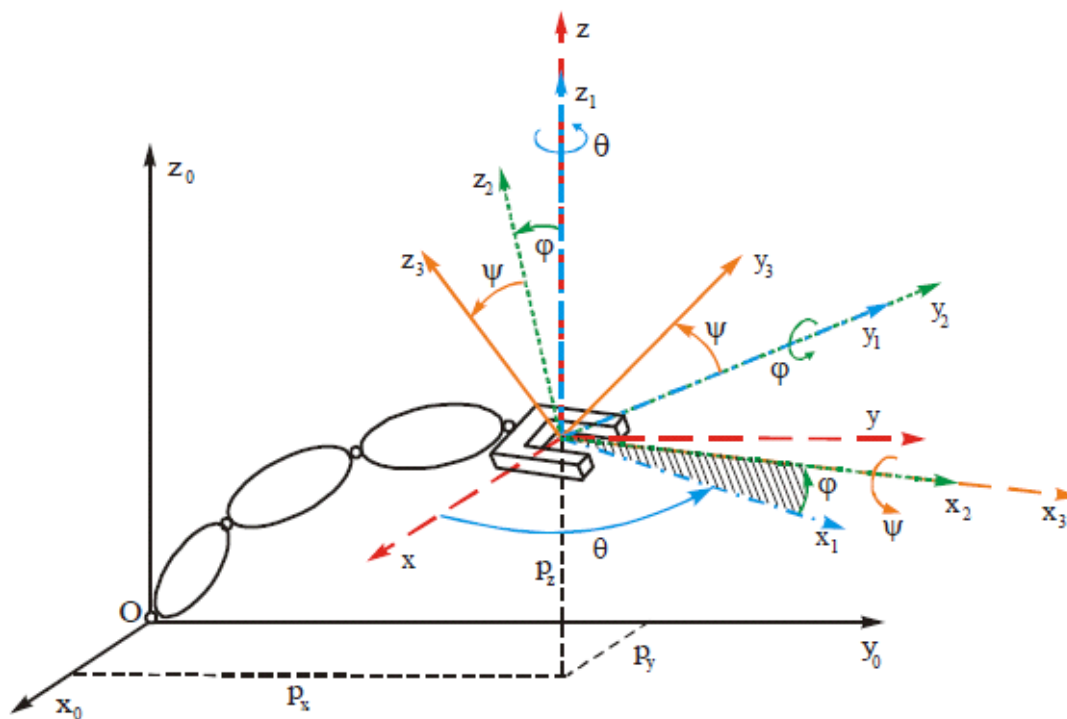
Код ротационог зглоба унутрашња координата је угао закретања у зглобу, док је код трансляторног кинематског пара унутрашња координата представљена линеарним померањем

дуж осе зглоба. Унутрашње координате се најчешће обележавају са q_i ($i = 1, \dots, n$) и чине вектор унутрашњих координата.

$$\{q\} = (q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n)^T. \quad (4.1) [1]$$

Број унутрашњих координата зависи од броја степени слободе кретања робота.

Спољашњим координатама се описује положај завршног уређаја робота у односу на непокретни координатни систем, који је везан за основу робота. Позиција прихватнице се најчешће описује *Descartes*-овим координатама (p_x, p_y, p_z) , а оријентација прихватнице се описује помоћу *Eulerovih* углова ротације (θ, φ, ψ) између оса координатног система везаног за прихватницу и непокретног координатног система.

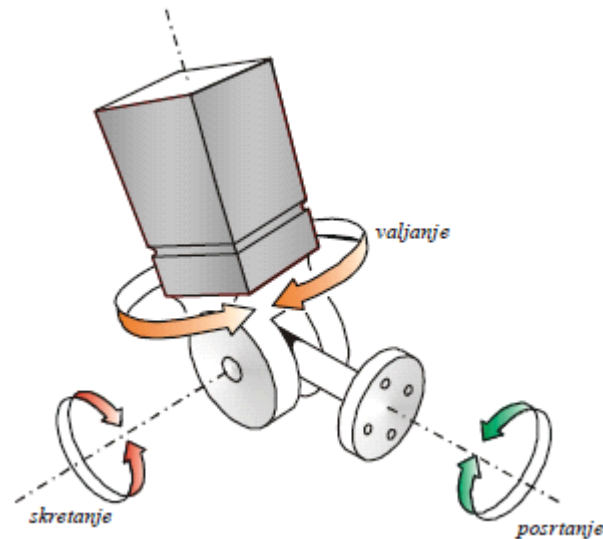


Слика 4.1. Изглед спољашњих координата прихватнице робота [1]

Вектор спољашњих координата чине координате неке тачке на прихватници (p_x, p_y, p_z) , најчешће је то центар инерције или врх прихватнице, у односу на непокретни координатни систем, као и углови (θ, φ, ψ) ротације између оса координатног система везаног за прихватницу и непокретног координатног система (сл. 4.1.). [1]

Угао скретања (енгл. *yaw*) θ , одговара ротацији око z осе непокретног координатног система, угао посртања φ (енгл. *pitch*) одговара ротацији око новодобијене осе y_1 , док угао ваљања ψ (енгл. *roll*)

одговара ротацији око новодобијене осе x_2 . Коначно се вектор спољашњих координата може записати као:

$$\{r\} = (p_x \ p_y \ p_z \ \theta \ \varphi \ \psi)^T. \quad (4.2)[1]$$


Слика 4.2. Еулерови углови прихватнице робота[1]

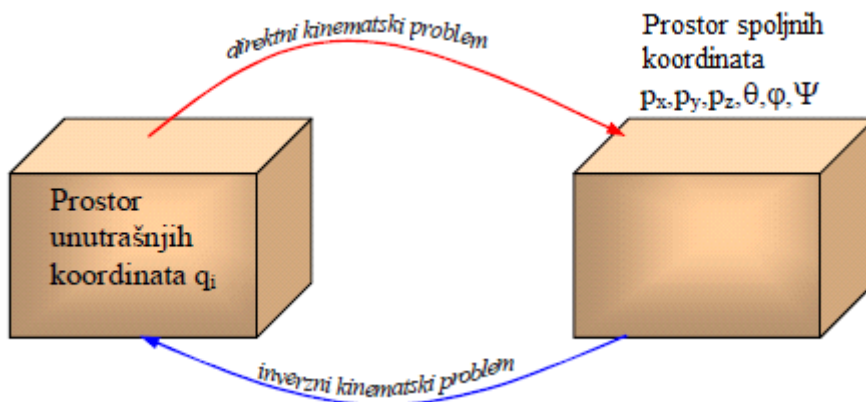
При промени унутрашњих координата робота q_i ($i = 1, \dots, n$) мењају се и спољашње координате r_i ($i = 1, \dots, m$). Ова веза се може описати релацијом:

$$\{r\} = f \{q\}, \quad (4.3)[1]$$

где је $f : R^n \rightarrow R^m$ нелинеарна, непрекидна, диференцијабилна векторска функција, која унутрашње координате пресликава у спољашње.

Проблем одређивања вектора спољних координата $\{p\}$ за задати вектор унутрашњих координата $\{q\}$ је познат као директан кинематски проблем.

Веза између унутрашњих и спољашњих координата приказана је на слици 4.3.[1]



Слика 4.3. Веза између спољашњих и унутрашњих координата[1]

5.0 Сензори у роботизи

5.1. Уводна разматрања

Сам развој уређаја који замењују човека на оним местима где су се машине показале продуктивнијим текао је одређеним редоследом.

Дошло је до великог развоја робота, чија ће примена бити изражена и у будућности. За саме произвођаче поставља се један веома осетљив задатак, а то је производња сензора, и замена људских високо развијених сензоричних способности. Ту долазимо до појма сензора који није баш јесно дефинисан у литератури, што се види из низа различитих назива: сонда, мерни давач, претварач и друго.

Сензори испоручују само делимичну информацију, због чега је потребно развити системе који су изграђени са више различитих сензора. Неки од захтева који се постављају за примену сензора у роботизи су:

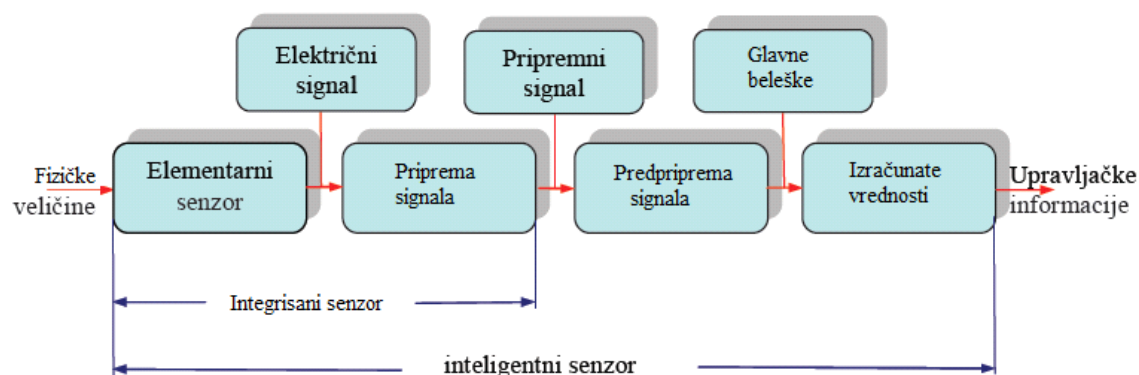
- да би приказали угаони положај зглоба, обично се на сваку осовину робота ставља енкодер;
- могућност трансформације зглобних координата у картезијском координатном систему;
- примена телероботике на местима где не може бити присутан човек (нпр. свемир);
- степен одређења је одређен аутономно од околине и тешко се одржава.

Три принципијална проблема мерења су:

1. постојеће кретање точкића мора се узети у обзир и израчунати картезијско кретање;
2. на основу мерних грешака (посртања) мора превозно средство поседовати могућност да се ручно оријентише због спољашњих околности. Флексибилност је јако ограничена (нпр. индукционо клизање по поду);
3. сметње.

До данас није решен проблем слободне додирне површине жељеног објекта. Сензори су системи који претварају физичке величине и њихове промене у погодне електричне сигнале. Ако у потпуности разумемо системе а притом се не јављају неконтролисане сметње онда можемо применити управљање. Ако се појављају сметње, онда на то морају имати утицаја улазне величине због примене информација о излазним величинама.

Сам редослед информација у систему сензора приказан је на слици 5.1.[1]



Слика 5.1. Проток информација у систему сензора [1]

Елементарни сензор преузима мерне величине и претвара их у примарни облик сигнала. Интегрисани сензор представља комбинацију интегрисаних сензора са управљањем израчунатих вредности.

Дакле, то су груби кораци: мерне величине --> преузимање --> припрема информације + решавање --> излаз --> резултат.

Комплекснији системи имају различите начине преузимања података према локалној припреми информација, снимају се резултати уз помоћ процесних модела.

5.2. Подела сензора

Постоје унутрашњи (позициони, брзински, сензори отклона, инерцијални, навигациони) и спољашњи (тактилни, приближни, за одступања, виртуални, позициони) сензори.

Подела сензора у роботизи је углавном на спољашње и унутрашње.

Начини на који се врши класификација сензора укључују:

- физички принцип на којем је сензор базиран;
- физичку или хемијску величину коју сензор мења;
- технологију која се користи код израде влакана;
- тип енергије: соларна, електрична, механичка;
- однос сензора и објекта који се прати: контакт, без контакта.

Данас се сензори спољашњег стања више користе од сензора унутрашњег стања. Регулација рада мотора и цилиндра врши се мерењем брзине, помераја, углова и сила.

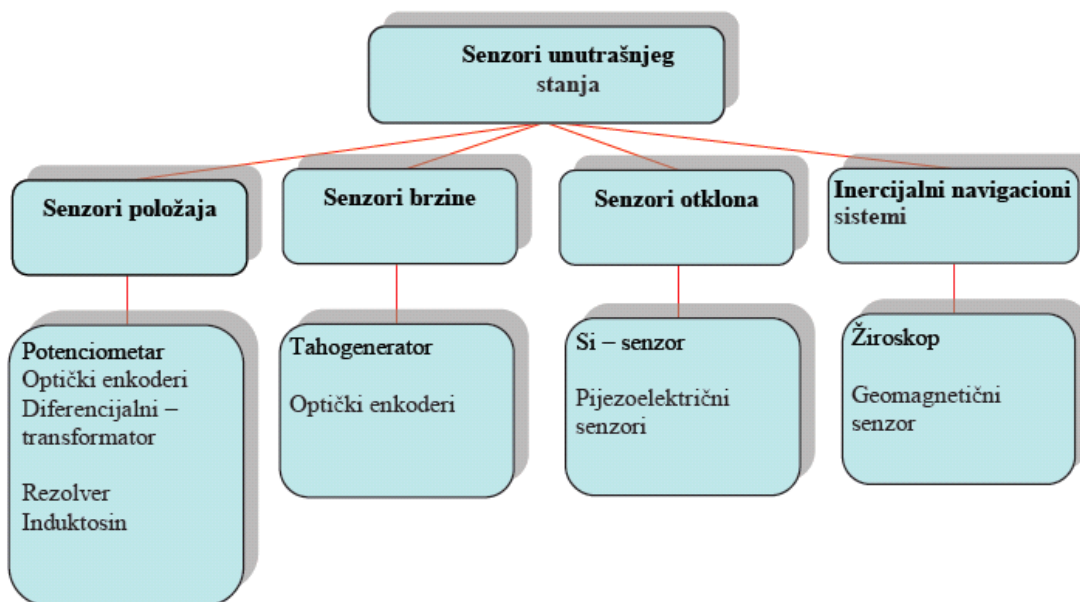
Развијањем робота иде се и на развој сензора као и система за препознавање спољашњих стања тј. система који ће прикупљати податке о стању околине робота (облицима, удаљености, размештају предмета, препрекама итд.).

Роботи ће моћи да реагују на такве ситуације у околини само уз подршку рачунара новијих генерација.

5.3 Сензори унутрашњег стања

За сензоре унутрашњег стања најбитнија је регулација правилног рада мотора. То је оствариво мерењем помераја углова механичког система, а од сензора се захтева најпре тачност, која зависи од грешака које се могу јавити у механичком систему.

Основне поделе сензора унутрашњег стања дате су на слици 5.3. [1]



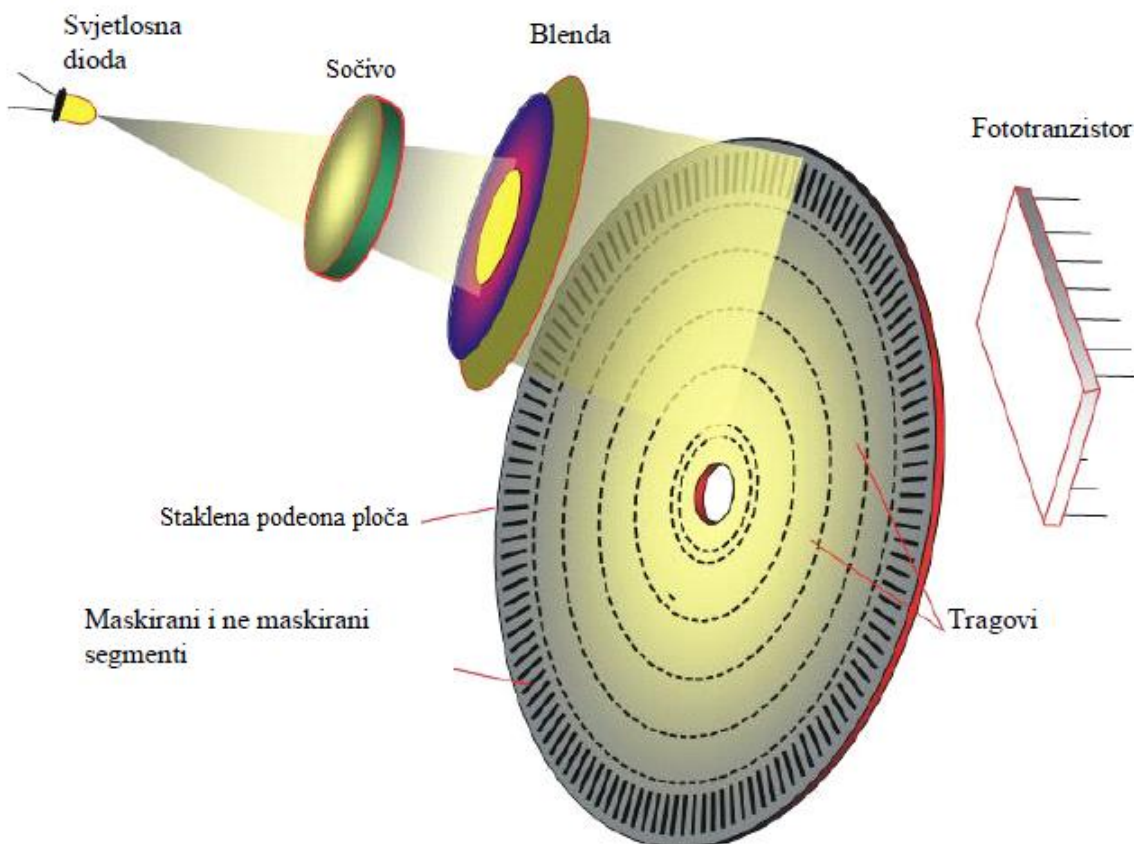
Слика 5.3. Групе сензора унутрашњег стања [1]

Као што види са слике 5.3., сензори унутрашњег стања су класификовани у четири групе: сензори положаја, сензори брзине, сензори отклона и инерцијални навигациони систем.

5.3.1. Сензори положаја

5.3.1.1. Инкрементални енкодер

За ове мерне даваче карактеристично је мерење угла обртаја вртила помоћу фотоелектричног ефекта. На слици 5.4.[1] дат је приказ принципа рада инкременталног енкодера.



Слика 5.4. Принцип рада инкременталног енкодера [1]

Обртањем диска добија се низ електричних импулса чији је број директна мера за угао закретања. Инкрементални (основни) енкодер се састоји од подеоне стаклене плоче по којој су радијално постављење црте, а те црте представљају маскиране и не маскиране сегменте.

Између извора светлости и подеоне плоче поставља се плоча за читавање. За инкрементални енкодер карактеристично је то да један траг на подеоној плочи за сваки обртај осовине производи одређени број синусних или правоугаоних таласа. Број излазних импулса је пропорционалан оцртаном.

За мерење окретаја одређеног угла већег од 360° примењује се трећи траг где се одређује референтни сигнал за свако компактно окретање.

Сва поља овакве радијалне мреже су осветљена паралелним зрацима преко сочива усмереним од једне светлосне диоде.

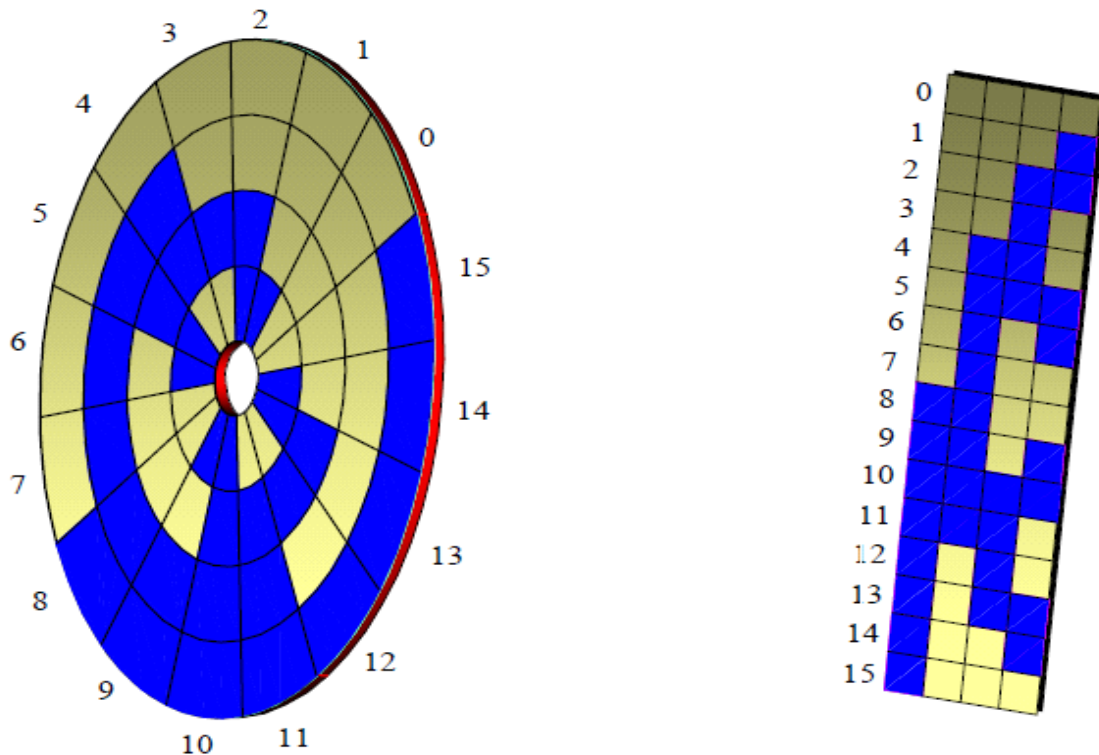
Обртањем подеоне плоче долази до наизменичног пропуштања светлости. Фототранзистори региструју сваки пут кад светлост прође кроз немаскирани сегмент подеоне плоче.

Инкрементални енкодер могу имати резолуцију од 250 до 2500 импулса/обртају.

Уградњом додатног оптичког система резолуција се може повећати и до једног милиметра. Проблем ових сензора је тај, да се у случају нестанка довода струје губе све релевантне позиционе информације и систем се мора поново калибрисати.

5.3.1.2. Апсолутни енкодер

Рад апсолутног енкодера се темељи на апсолутном мерном поступку. За сваки положај придружује се бинарна комбинација. Апсолутни енкодер може бити изведен као подеона плоча односно као кодни лењир како је то приказано на слици 5.6.[1]



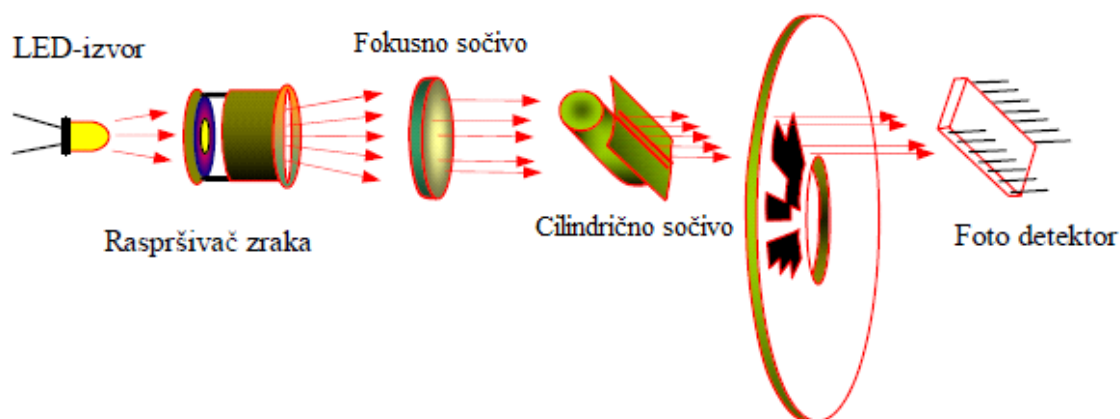
Слика 5.6. Апсолутни енкодер: а) кодирана плоча, б) кодирани лењир.[1]

Кодирана плоча се примењује за мерење углова и она је израђена од висококвалитетног стакла. Сваки је корак на плочи кодно дефинисан.

Елементи који утичу на тачност апсолутног енкодера су:

- квалитет радијалне мреже;
- грешка при укључивању спојнице са ротором;
- зазор у лежајевима;
- ексцентрицитет подеоне плоче у односу на улежиштење.

Принцип рада апсолутног енкодера дат је на слици 5.7.[1].



Слика 5.7. Принцип рада апсолутног енкодера.[1]

Принцип читавања је сличан као код инкременталног енкодера. Светлост пада аксијално на кодирану плочу, а са доње стране се налазе фото ћелије које при осветљењу дају фото напон од 2,5V и при том напону се даје бинарна цифра 1. Ако детектор светлости није осветљен, напон је нула што одговара бинарној цифри 0. На слици је дата кодирана плоча са четири трага тако да је $2^4 = 24$ комбинација. То значи да се са оваквом кодираном плочом може идентификовати 16 положаја односно 16 углова.

У пракси се примењују кодиране плоче са 18 - 16 трагова а најчешће са 12 трагова. Таква кодирана плоча може идентификовати $2^{12} = 4096$ могућих положаја. У случају да треба покрити 360° , најмања вредност резолуције је:

$$c = 360^\circ / 4096 = 0,088^\circ = 5,28' \quad [1]$$

Ако се жели повећати тачност читавања углова, потребно је да плоча има више трагова, а самим тим се и повећавају димензије кодиране плоче.

Понекад се због клизања из различитих положаја мења више различитих битова, а то доводи и до грешке читавања. Због тога се код означавања низа кодираних бројева употребљава Gray-ев, код кога је разлика између суседних бројева највише 1 бит.

Gray-ев код спада у класу цикличних кодова. Због смањења могућности грешке нашао је примену у А/Д претварачима, апсолутним енкодерима и сл.

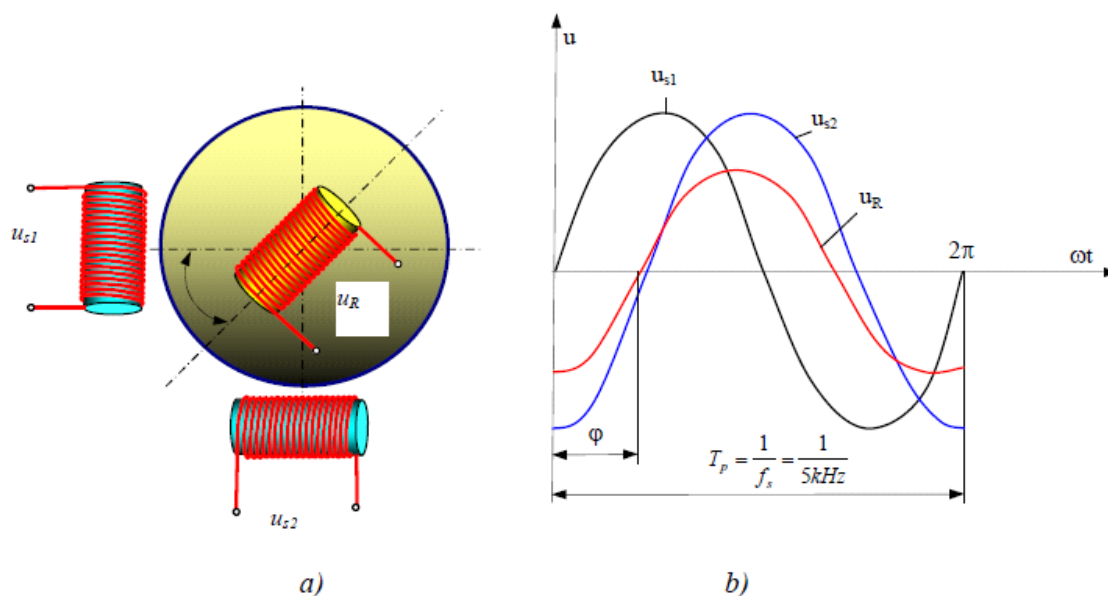
Осим Gray-овог кода у роботизи се користе још BCD код - 8421 који представља такозвано бинарно - декадни бројни систем.

Поред наведеног постоји још и Gray-ekscs - 3 код који је у ствари мешавина BCD Gray-ekscs кода.

5.3.1.3. Резолвер

Резолвери су слични електромоторима и спадају у групу електромеханичких мерних уређаја за одређивање позиције вратила зглоба робота. Резолвер се састоји од статора са два намотаја геометријски постављених под углом од 90° и ротора у којем се налази један намотај.

Шематски приказ резолвера дат је на слици 5.9.[1]



Слика 5.9. Резолвер: а) шема деловања, б) графички приказ побудних напона [1]

Рад резолвера је заснован на електромагнетној индукцији. На намотај статора се доводе напони u_{s1} и u_{s2} , чије су амплитуде једнаке и померене за 90° .

$$u_{s1} = U_s \sin(\omega_s t) \quad (5.1)[1]$$

$$u_{s2} = U_s \sin(\omega_s t - \pi/2) - U_s \cos \omega_s t \quad (5.2)[1]$$

Регулацију побудних напона врши бројило. Вратило зглоба покреће ротор чији се угао j мери.

У намотају ротора се индукује напон:

$$u_R = K [u_{s1} \cos(\varphi) + u_{s2} \sin(\varphi)] \quad (5.3)[1]$$

Уврштавањем израза за напон u_{s1} и коришћењем тригонометријских трансформација добија се напон који се индукује у намотајима ротора:

$$u_R = K U_s [\sin(\omega_s t) \cos \varphi + \sin(\omega_s t) \sin \varphi],$$

$$u_R = U_R \sin(\omega_s t - \varphi) \quad (5.4)[1]$$

K - напонски однос

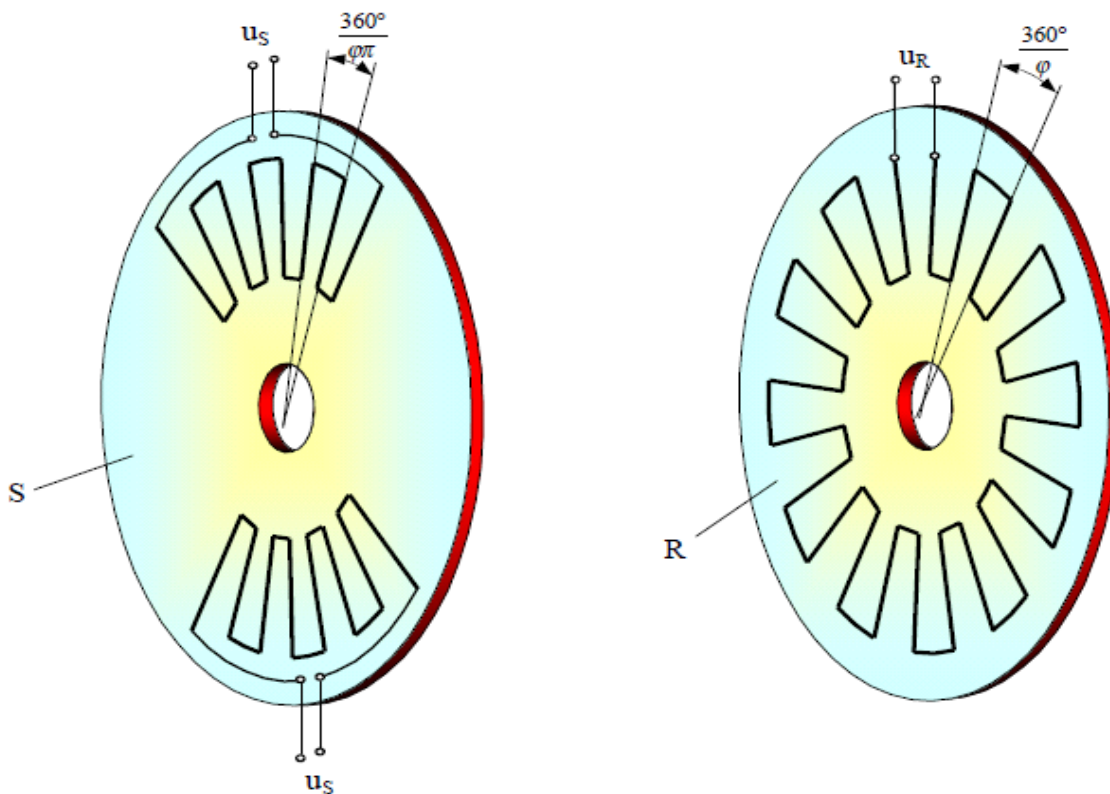
Као што се види напон је у функцији угла j који је угао закретања вратила зглоба робота.

Графички приказ побудних напона дат је на слици 5.9.б).[1].

5.3.1.4. Индуктосин

Индуктосин се састоји од статора и ротора који имају облик двеју округлих плоча направљених од немагнетичног материјала, како је то приказано на слици 5.10.

Принцип рада индуктосина је сличан принципу рада резолвера. На статору су нанесена два вода, а на ротору један.



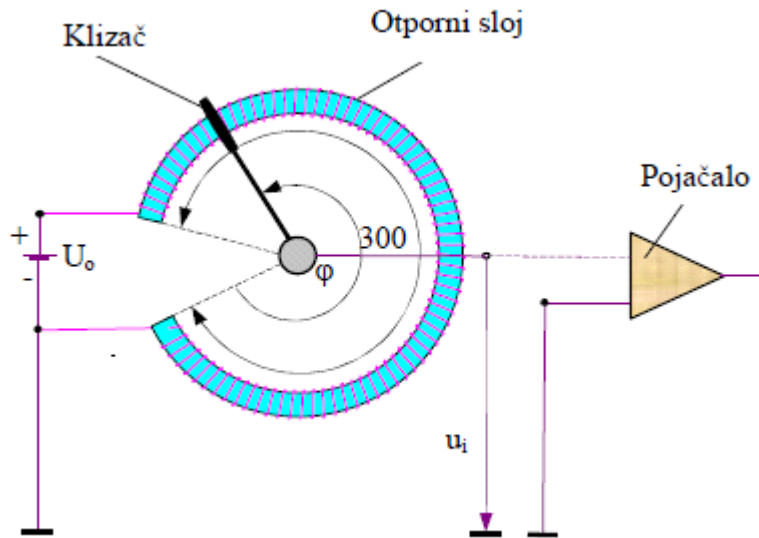
Слика 5.10. Индуктосин [1]

Обе плоче се монтирају једна уз другу са зазором од 0,15 до 0,4 мм. Одржавање уских толеранција зазора између плоча, њихова паралелност и ексцентричност чине овај мерни систем скупљим. Индуктосином се може постићи и резолуција до једне секунде. Могуће су врсте индуктосина за мерење помераја, само су у том случају и статор и ротор у облику лењира.

5.3.1.5. Потенциометри

Ови сензори представљају најједноставнију групу система за мерење положаја. Претварају помераје (линеарне и угаоне) у електрични напон.

На слици 5.11.[1] је приказан ротациони потенциометар. Елемент отпорности може бити калем од хром - никл (жица, угљена шипка или отпорна пластика).



Слика 5.11. Ротациони потенциометар[1]

Отпорнички елемент у већини случајева има линеарну отпорност. Клизач је спојен са осовином зглоба робота, чије се кретање мери. Померањем зглоба помера се и клизач по отпорничком делу. Напон је пропорционалан положају зглоба. Тачност мерења положаја помоћу потенциометра је приближно 0,5%. За тачније мерење извор напона мора бити изузетно стабилан.

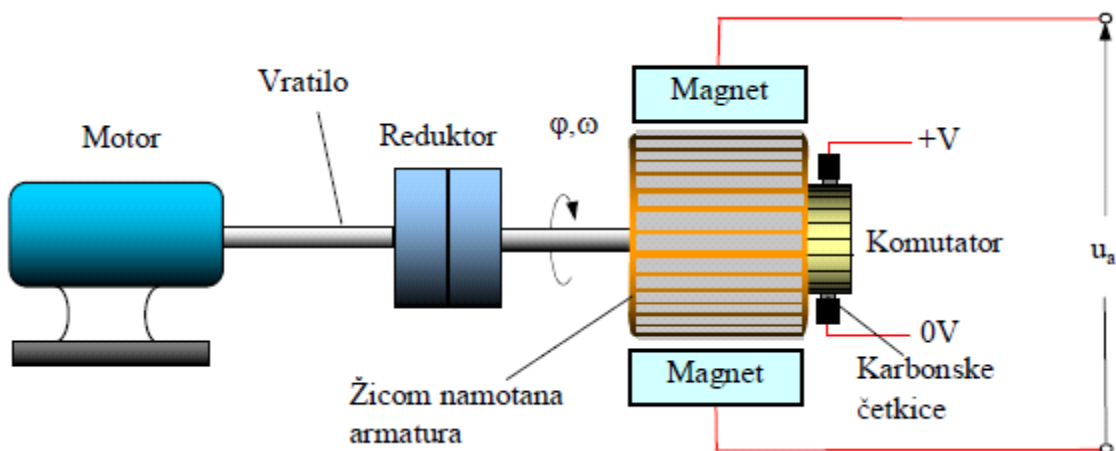
Транслаторни потенциометар се састоји од два отпорника. Они омогућавају мерење померања у позитивном и негативном смеру.

5.3.2. Сензори брзине

За проучавања кинематско - динамичких карактеристика није довољно познавати само положај робота. До сада су описани сензори који су давали информације о положају робота. Сензори брзине дају информације о величини зглобних брзина и убрзања. Пошто се у роботизи најчешће користе ротациони зглобови, овде ће бити описани неки важнији сензори брзине.

5.3.2.1. Тахогенератор

Излазни сигнал код ових сензора је пропорционалан улазној угаоној брзини. Тахогенератор у ствари није ништа друго него мотор једносмерне струје са перманентним магнетима, слика 5.16.[1]. Његова функција у овом случају је обрнута и он ради као генератор.



Слика 5.16. Једносмерни тахогенератор[1]

Да би измерили угаону брзину зглоба, вратило тахогенератора се преко редуктора спаја са зглобом. Тахогенератор се састоји од ротора са намотајем који ротира унутар магнетног поља побуђеног магнетима који су фиксирани на статору. Окретањем осовине зглоба окреће се и ротор, тако да се у арматурном намотају индикује напон u_a :

$$u_a = K \frac{d\phi}{dt} = k \omega \quad (5.7)[1]$$

где је K константа.

Излазни напон арматуре u_a је пропорционалан улазној угаоној брзини ω .

5.3.2.2. Дигитални тахометри

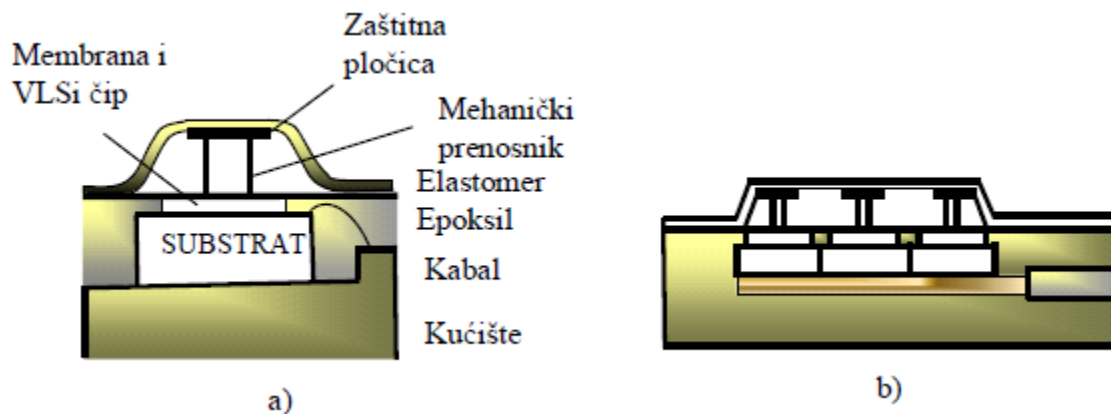
Дигитални тахометри раде на принципу бројача, слично инкременталном енкодеру. Бројач региструје одређени број импулса добијених од фотоелемената на које пада светлост кроз зарезе на кодираној плочи и на тај се начин добија измерени угао. Када се тај угао подели са временским интервалом током којег је генерисан импулсни низ, добија се угаона брзина.

5.3.3. Сензори отклона

За ову врсту сензора неопходно је боље решење конструкције и висока тачност. За њихову примену су неопходни аутономни мобилни роботи.

5.3.3.1. Си-сензори

Код Си-сензора прекид се не може директно измерити, него се мора индиректно одредити преко деловања носиве масе. Ови сензори спадају у групу сензора нове генерације. На силицијумску основу се поставља слој еластомера слика 5.17.[1] у циљу заштите од механичких оштећења.



Слика 5.17. Си-сензор : а) изглед сензора, б) распоред тактела [1]

Уопштени мерни инструмент је Си-чип који се у основи састоји од масе постављене на лежају. Силицијум као материјал микромеханичких елемената се показао као изванредан јер има линеарну деформацију, изванредну чврстоћу и добре динамичке карактеристике.

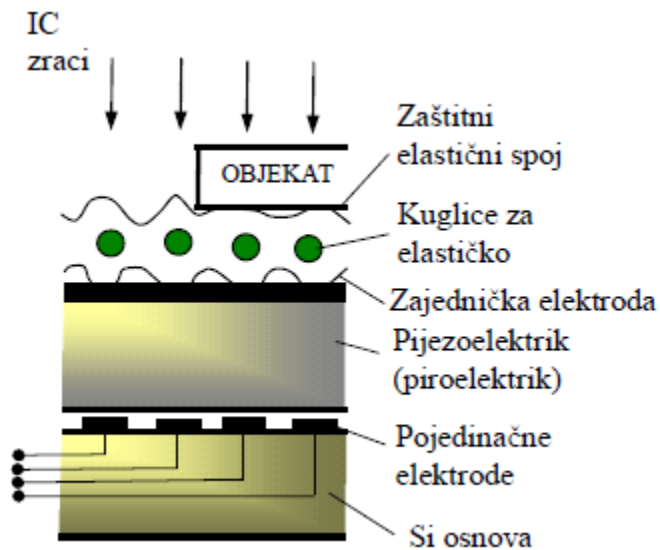
Деформациони елемент је у облику мембране. У центру мембране се налази цилиндрични штапић за пренос спољашње силе. На врху се налази заштитна плочица дебљине 250 μm чија је намена спречавање кривања еластомера.

Деформација елемената се детектује помоћу пијезоотпорника спојених у Wheatstoneov мост. Типична редукција је 0,25 x 0,25 mm са фреквенцијом читавања 60 Hz.

5.3.3.2. Пијезоелектрични сензор

Структура ових сензора је вишеслојна слика 5.18.[1].Основа сензора је силицијумска и на њој се наносе електроде пречника 1,5 до 6 mm .

Електроде су заливане смолом да би се постигла чврстоћа. Затим је нанет слој пијезокерамике (10 - 100 μm) од баријум - титанита.



Слика 5.18. Пијезоелектрични сензор [1]

Добри резултати код ових сензора се постижу применом поликристалних материјала. Овај сензор нема вештачку кожу као деформациони елемент. За ове сензоре карактеристична је појава пиезоелектрицитета. На основу пиезоелектричног ефекта добија се пројекција продукта на површину сензора. Могуће је детектовати силе од 0,01 N, линеарност 0,2 - 0,3 % и фреквентни опсег 0,2 - 0,3%. Слика се добија у бинеарном облику па се онда посебним програмом прорачунава позиција и оријентација предмета. Код сложених случајева информације са тактела се скенирају и надаље се обрађују ради добијања интегралне слике.

Програми за обраду слике побољшавају тачност сензора, тако нпр. за сензор 16x16 елемената просторне резолуције 8 mm пречника 6 mm, центар се детектује са грешком +/- 0,25 mm.

5.3.4. ИНС (Инерцијални навигациони систем)

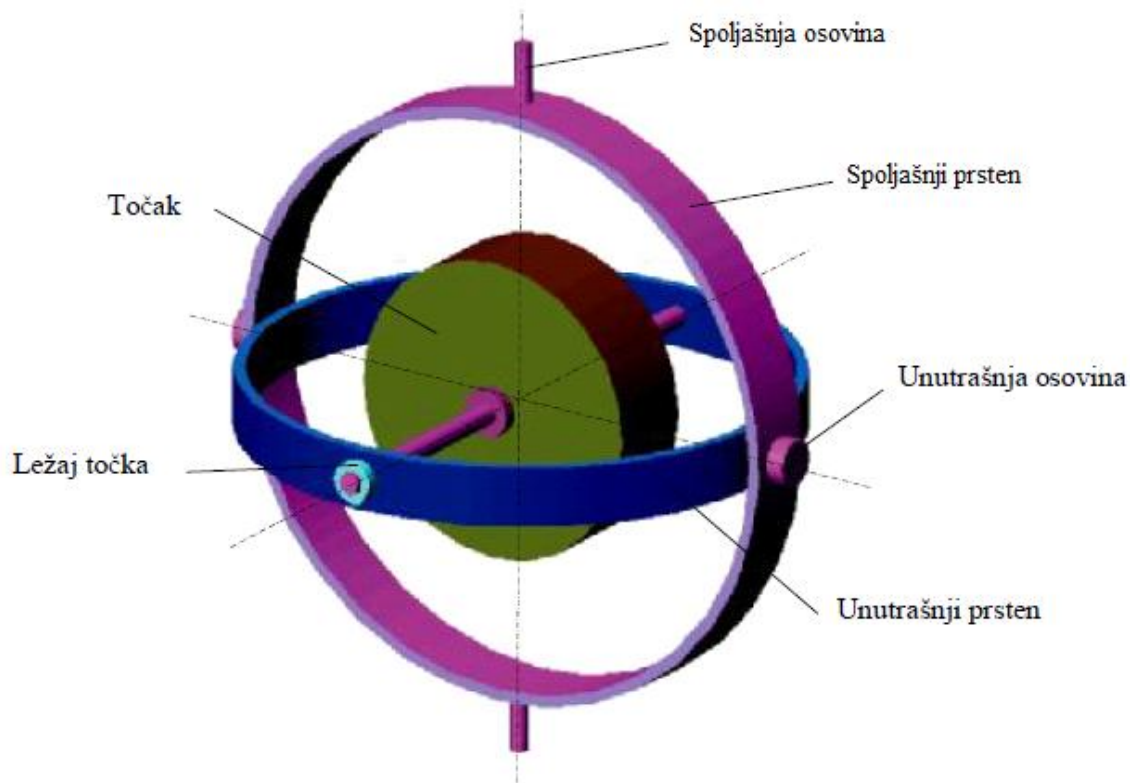
Сензори правца су нарочито важни за одређивање позиције мобилних робота. Свака грешка у оријентацији проузрокује константне растуће грешке у позицији. Због тог разлога повећава се предност уколико се грешке у оријентацији открију и непосредно се исправе.

5.3.4.1. Механички жирокоп

Механички жирокоп је врло познат сензор ротације чији је рад базиран на инерцијалним особинама рапидног напрегнутог ротора. Механички жирокоп је развијен ране 1800. године.

Први познати жирокоп је направљен 1810. године (*G.C.Bomberger*) у Немачкој. 1852. године француски физичар *Leon Foucault* је приказао да жирокоп може открити ротацију земље.

Жирокопи се користе код робота да би се одржавала њихова стабилност. Принцип рада механичког жирокопа на слици 5.19. се може приказати на примеру вожње бицикла.



Слика 5.19. Механички жирокоп [1]

Интересантну особину механичког жирокопа, познату као прецизност жирокопа, осетиће возач бицикла. Уколико возач бицикла нагне бицикл на леву страну око његових хоризонталних оса, предња оsovина се окреће лево око вертикалних оса. Учинак је још већи, уколико се оsovина одвоји од бицикла и држи оба краја оsovине док се убрзано помера.

Настаје изненађујуће велика реакција, где уместо увијања настаје хоризонтално окретање оsovине. То је због тога што је угаони момент повезан са напрезањима слободне оsovине која раздваја примењену силу при 90° у смеру напрезања.

5.3.4.2. Геомагнетични сензори

Значај ових сензора се огледа у његовом утицају на грешке. Ови сензори омогућавају мерење апсолутног управљања и релативне угаоне брзине и због тога су као такви битни у решавању навигационих проблема. Најопштији познати сензор ове врсте је магнетни компас. Уобичајена техника је да се мери јачина магнетног поља, густина магнетног флуksа B која се мери у G (гаус). Алтернативне јединице су Тесла ($1T$), при чему је $1T = 10^4 G$. Инструменти који мере магнетна поља су познати као магнетометри. Сензори ове врсте се користе код мобилних робота, могу се поделити у следеће категорије:

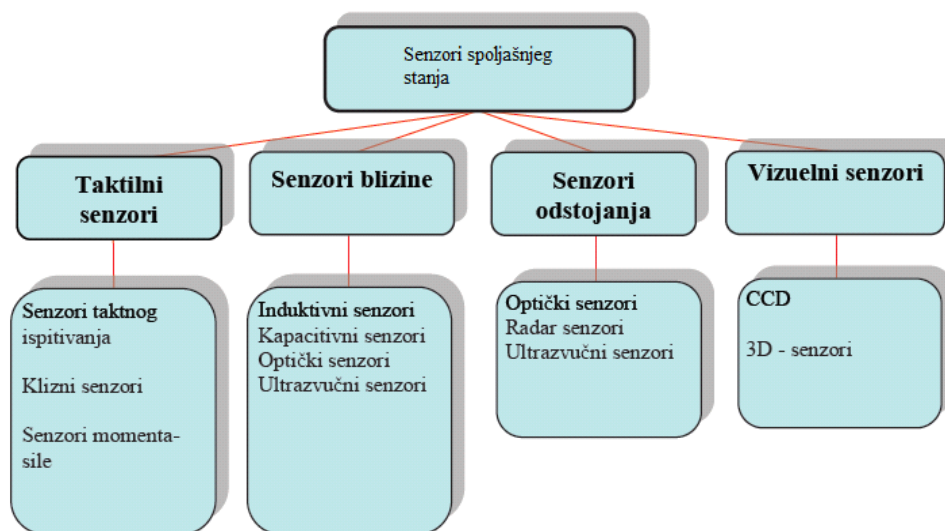
- механички магнетни компаси;
- компаси са подлогом за флуks:
- компаси са Халл-овим ефектом;
- магнетноотпорни компаси;
- магнетноеластични компаси.

5.4 Сензори спољашњег стања

За правилну оријентацију и понашање робота у околини, потребно је да робот поседује такве мерне инструменте који ће адекватно прикупљати податке.

Класификација сензора спољашњег стања дата је на слици 5.20.[1]

Сензори спољашњег стања се могу класификовати на контактне и бесконтактне у зависности од тога да ли постоји контакт или не.

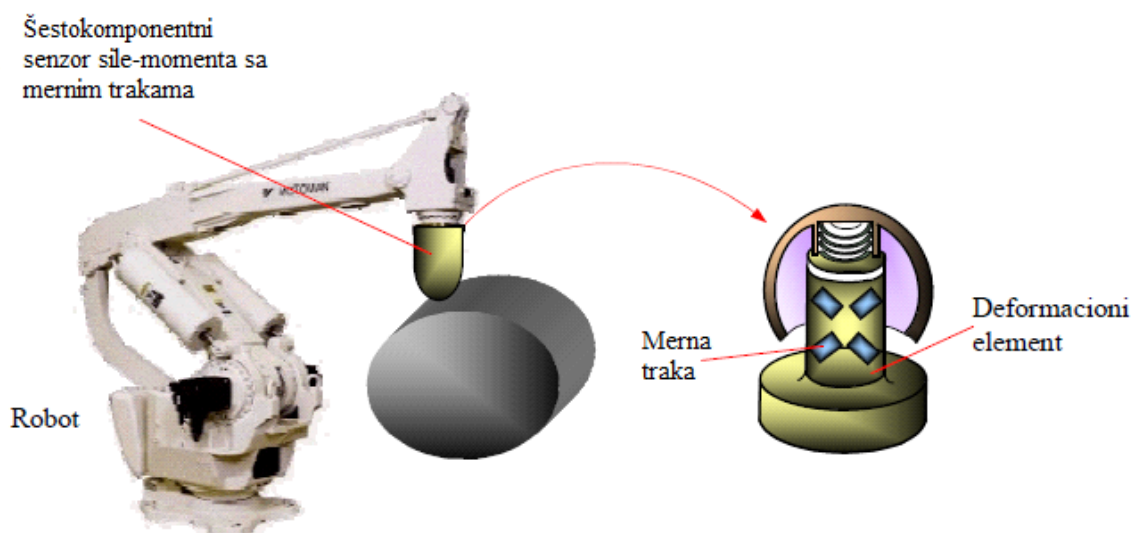


Слика 5.20. Основне групе сензора спољашњег стања

5.4.1. Графички прикази спољашњих сензора

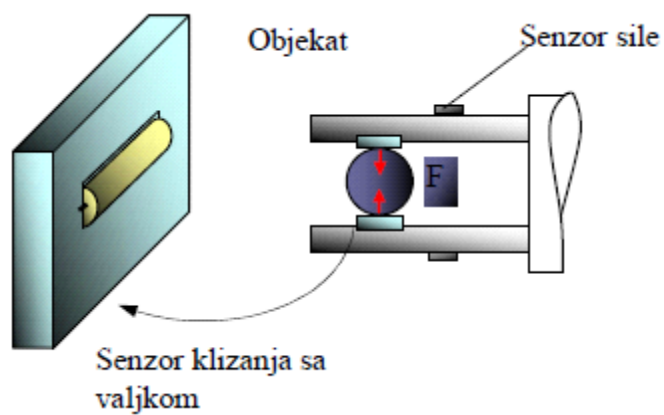
У овом делу рада представљени су само графички прикази примера одређених сензора.

1) Тактилни сензор



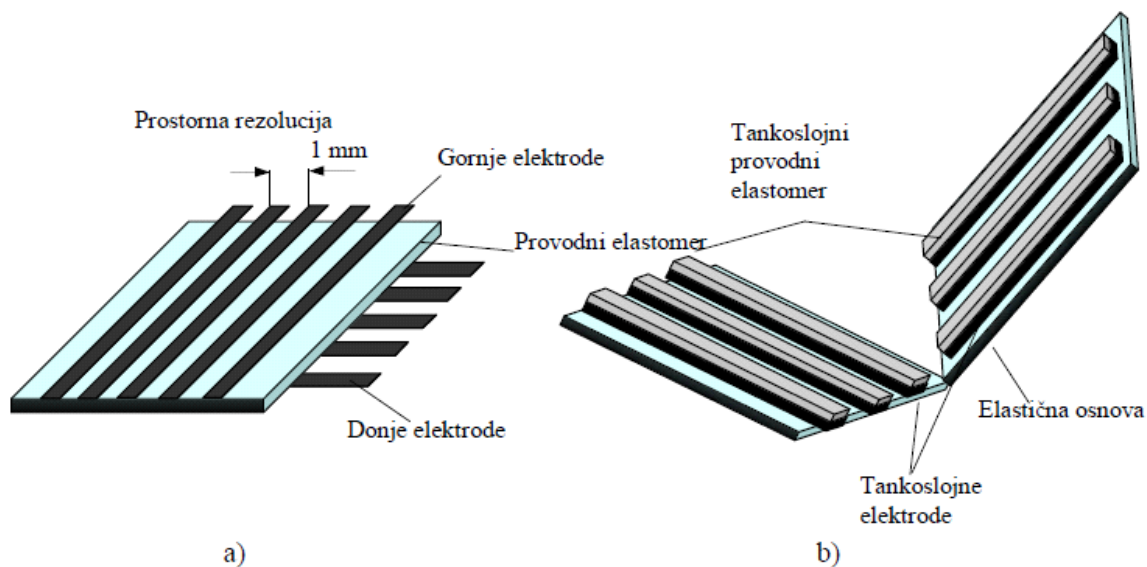
Слика 5.21. Мерење контактне силе шестокомпонентним сензором на прсту [1]

2) Сензор клизања



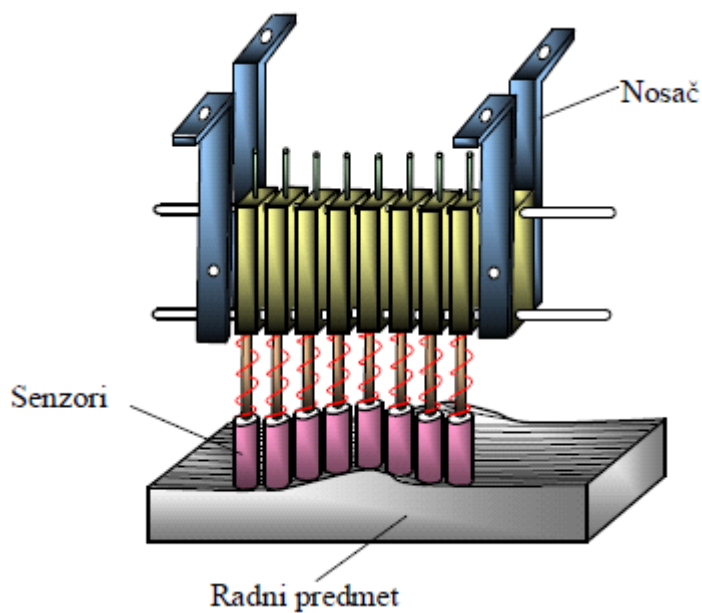
Слика 5.22. Једноставни сензор клизања [1]

3) Сензори базирани на промени отпора



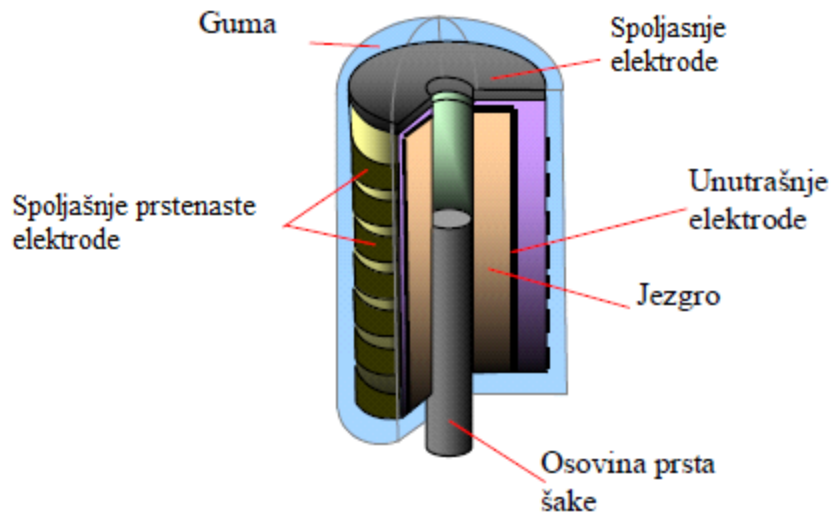
Слика 5.23. а) конструкција са отпорничким слојем, б) са тракама од полимера[1]

4) Електромагнетни индуктивни сензор

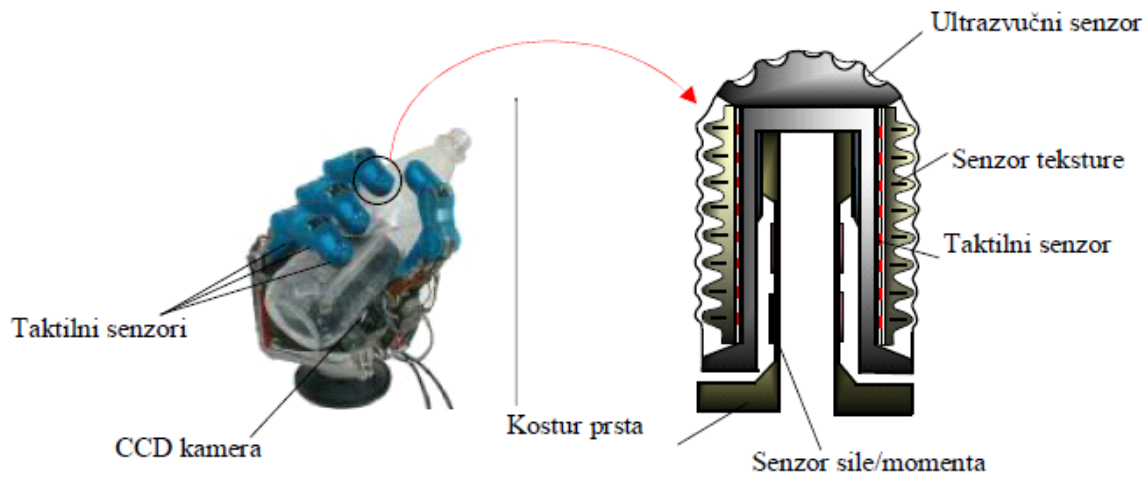


Слика 5.24. Електромагнетни индуктивни тактилни сензор[1]

5) Капацитивни тактилни сезнор

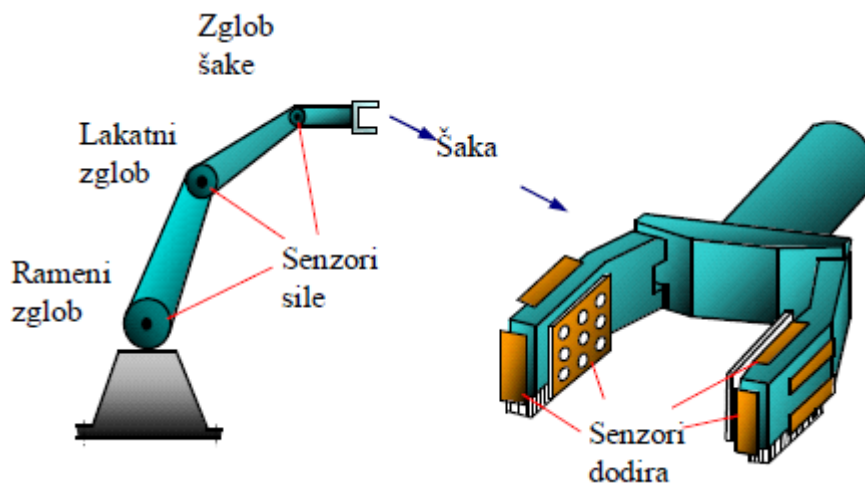


Слика 5.25. Распоред плочастих кондензатора на прсту[1]



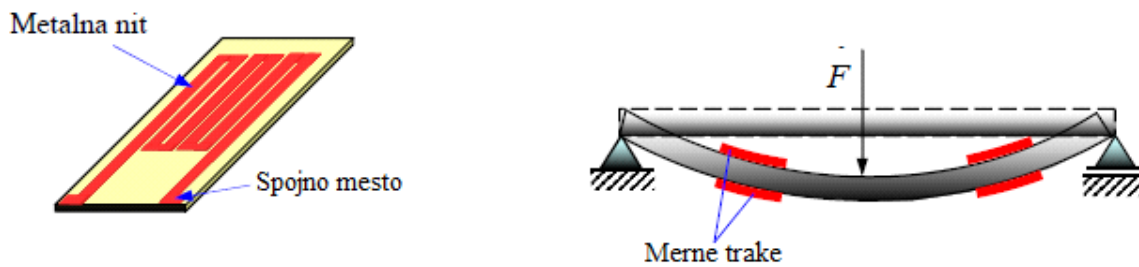
5.26. Комбиновани тактилни сензор на прсту прихватнице[1]

6) Сензори силе и момента



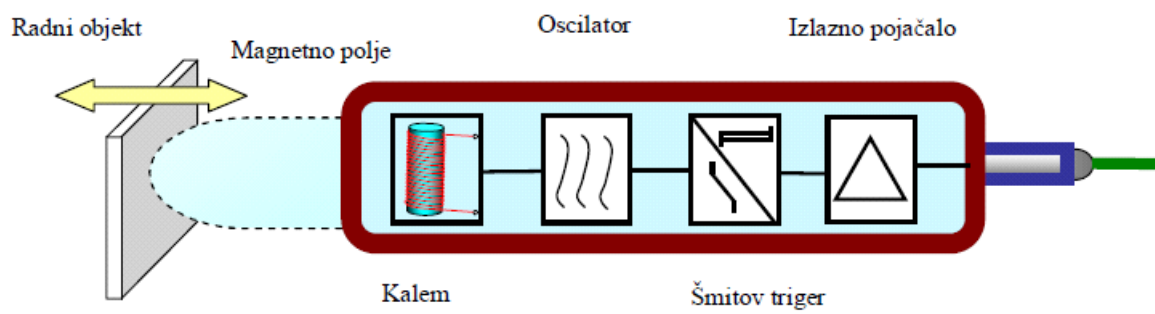
Слика 5.27. Места уградње сензора силе – момента[1]

7) Сензори са мерним тракама

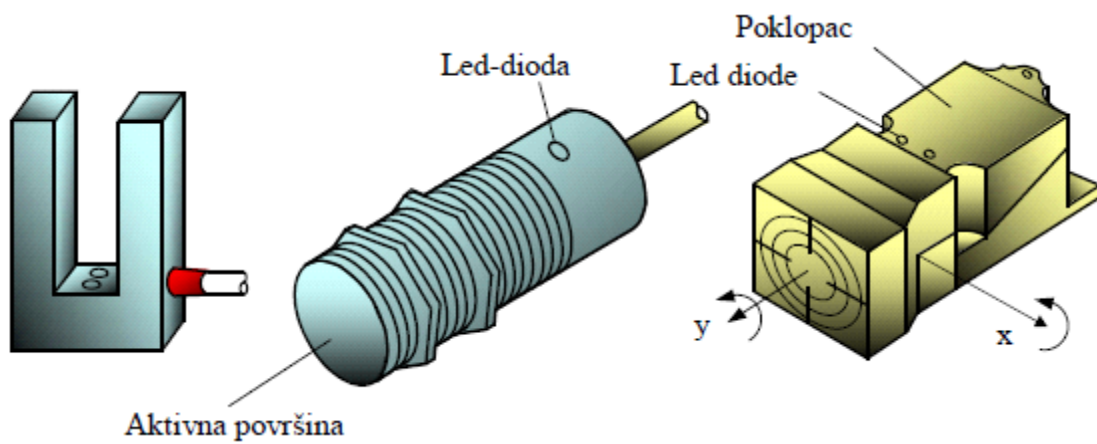


Слика 5.28. Мерне траке и места за њихову уградњу [1]

8) Индуктивни сензор близине

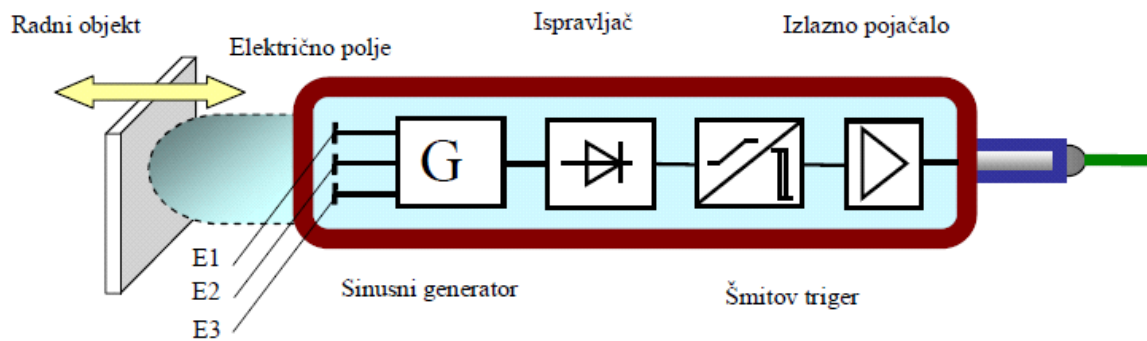


Слика 5.29. Структура индуктивног сензора близине [1]



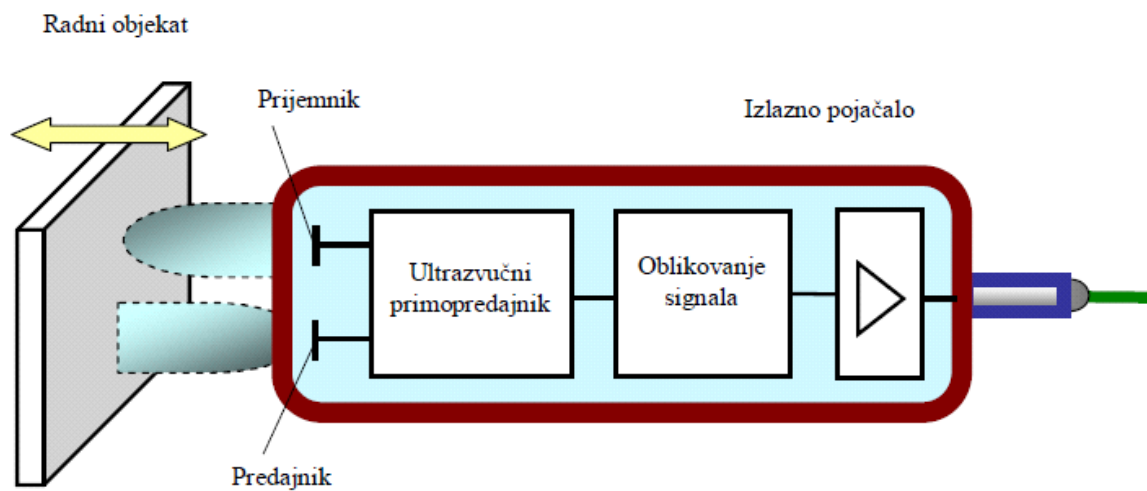
Слика 5.30. Неке од конструкција индуктивних сензора [1]

9) Капацитивни сензори близине



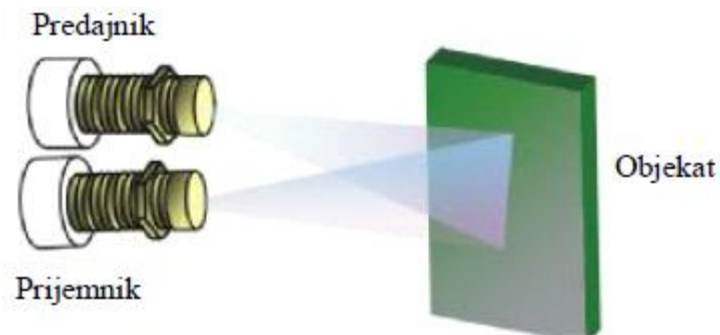
Слика 5.31. Структура капацитивног сензора [1]

10) Ултразвучни сензори близине



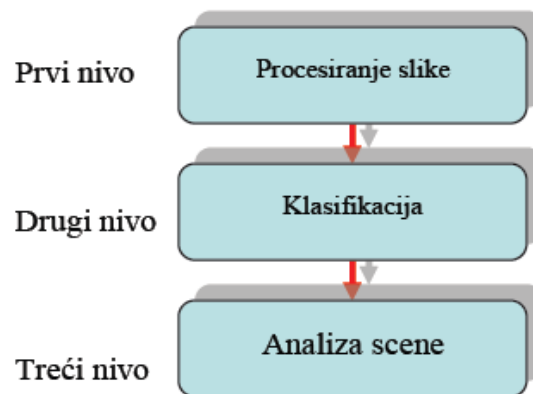
Слика 5.32. Структура ултразвучног сензора [1]

11) Оптички сензори близине

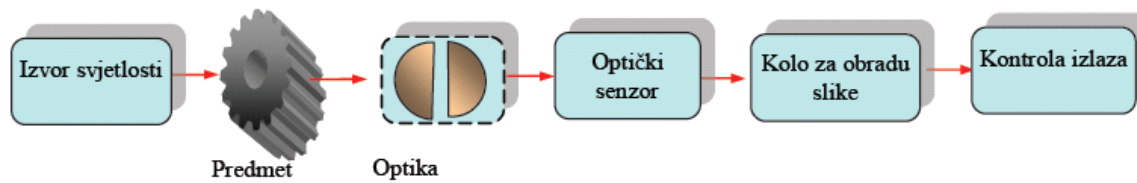


Слика 5.33. Оптички сензор код препознавања предмета [1]

Сензори визије

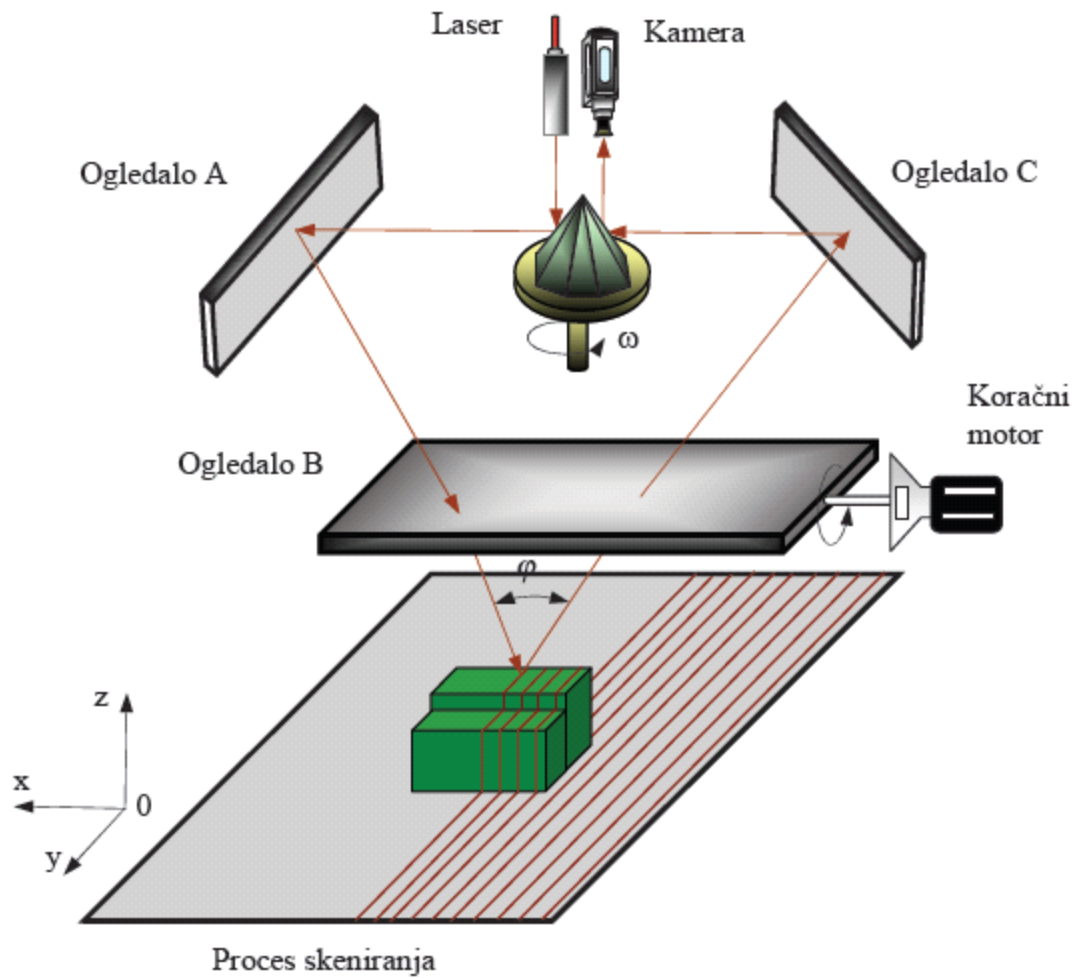


Слика 5.34. Основна три нивоа сензора визије [1]



Слика 5.35. Основне компоненте сензора визије [1]

12) 3-Д сензори визије



Слика 5.36. Тродимензионални сензор са аутосинхронизацијским скенирањем објекта[1]

6.0 Погони робота

6.1 Врсте погона робота

Мотори који омогућавају кретање у зглобовима робота називају се погони или актуатори. Постоје три главна типа актуатора који се користе, а то су:

- Пнеуматски
- Хидраулични
- Електрични

Пнеуматски погон користи се код једноставнијих манипулатора који служе за опслуживање машина тј. за обављање простијих понављајућих операција не узимајући у обзир облик трајекторије између почетне и крајње тачке. Зглобове робота покрећу цилиндри компримованог ваздуха. Овај погон омогућава брз и поуздан рад уређаја али тешко остварује кретање по задатом закону.

Хидраулички погон омогућава успостављање веће тачности управљања зглобом захваљујући сервовентилима (разводницима) који омогућавају успостављање пропорционалности између протока уља и управљачке структуре.

Хидроулички погони се још увек користе када су у питању носивости веће од 100кг. За подручје носивости од 1 – 100кг користе се електрични погони, док се за мање масе од 0,2 – 15кг користе пнеуматски погони.

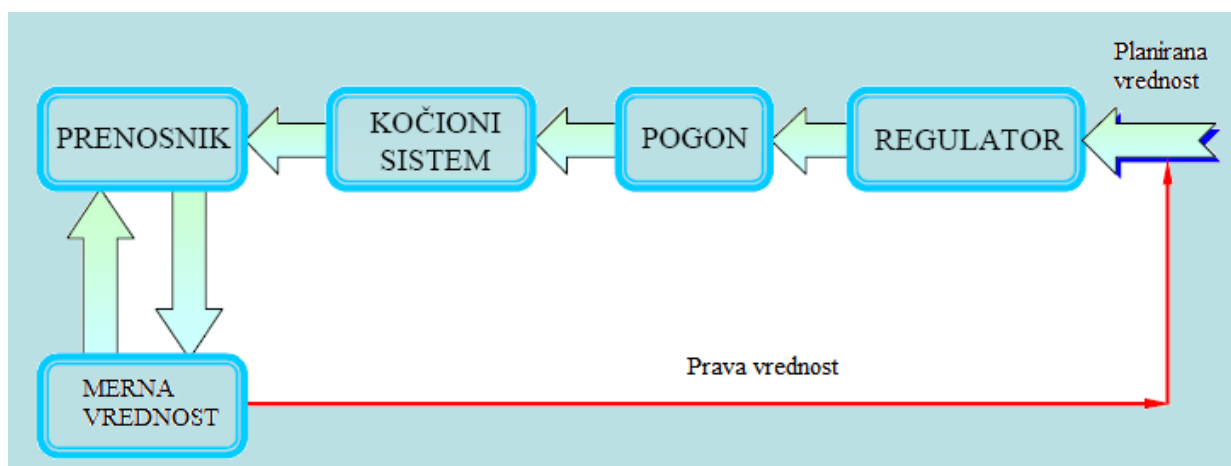
Табела 6.1 Поређење роботских система [1]

VRSTA POGONA	NOSIVOST (kg)	TAČNOST POZICIONIRANJA (mm)	BRZINA (m/s)
PNEUMATSKI	0,2 – 15	±0,1 – 1,0	0,3 – 1,0
HIDRAULIČNI	40 – 500	±0,1 – 2,0	0,75 – 5,0
ELEKTRIČNI	1 - 100	±0,02 – 1	0,5 - 10

Погони робота имају задатак да постигну задату путању, позиционирају и оријентишу завршни уређај. Најважнији захтеви које погони морају задовољавати су:

- мала тежина и запремина мотора
- већи обртни моменти
- веће подручије угаоног закретања
- већа тачност позиционирања
- велика поузданост итд.

Шематски приказ једног погонског система дат је на слици 6.1.[1].



Слика 6.1. Шематски приказ погонског система[1]

6.2. Пнеуматски погон

Пнеуматски погони користе за погон потенцијалну енергију садржану у флуиду (ваздух). Пнеуматика је погонда за мање снаге, јер како је познато ваздух је тешко компримовати и постоји реална опасност да дође до експлозије, па би из тог разлога за постизање већих снага били потребни велики пречници цилиндара.

Овакав тип погона има својих предности али и недостатака.

Предности пнеуматског погона су:

- релативно мала цена,
- једноставна израда
- брзо време реакције
- остваривост праволинијских и обртних кретања
- отпорност на преоптерећење, запаљивост, високе температуре, зрачење и електромагнетн сметње.

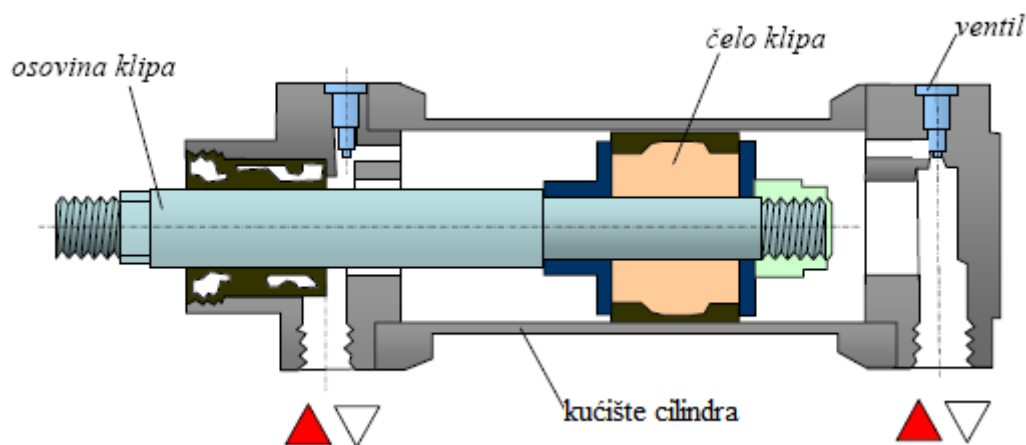
Недостаци пнеуматског погона су:

- бука при раду,
- неконтролисана брзина кретања,
- погон од тачке до тачке,
- лоше позиционирање,
- потреба за сушењем, чишћењем и подмазивањем,
- мања способност преношења великих терета,
- краћи радни век.

За заустављање робота и дефинисање његовог кретања користе се механички граничници.

Пнеуматски систем се састоји од следећих компоненти:

- клип и цилиндар

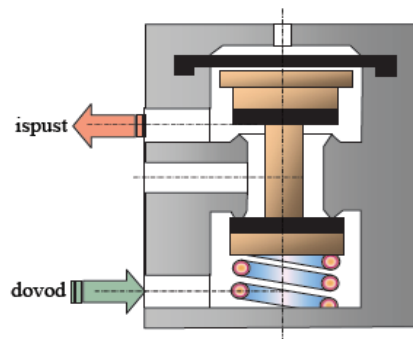


Слика 6.2. Пнеуматски цилиндар [1]



Слика 6.3. Неке од решења пнеуматских цилиндара [1]

Слика 6.2. приказује линеарни клип. То је клип који се покреће од једне границе свог радног хода до друге у зависности од смера погонског ваздуха. Подешавање тока ваздуха омогућује кочење осовине клипа на граници. Постоје обртни клипови, али то су у суштини линерани клипови код којих клипна осовина садржи озубљену полугу која покреће зупчаник.



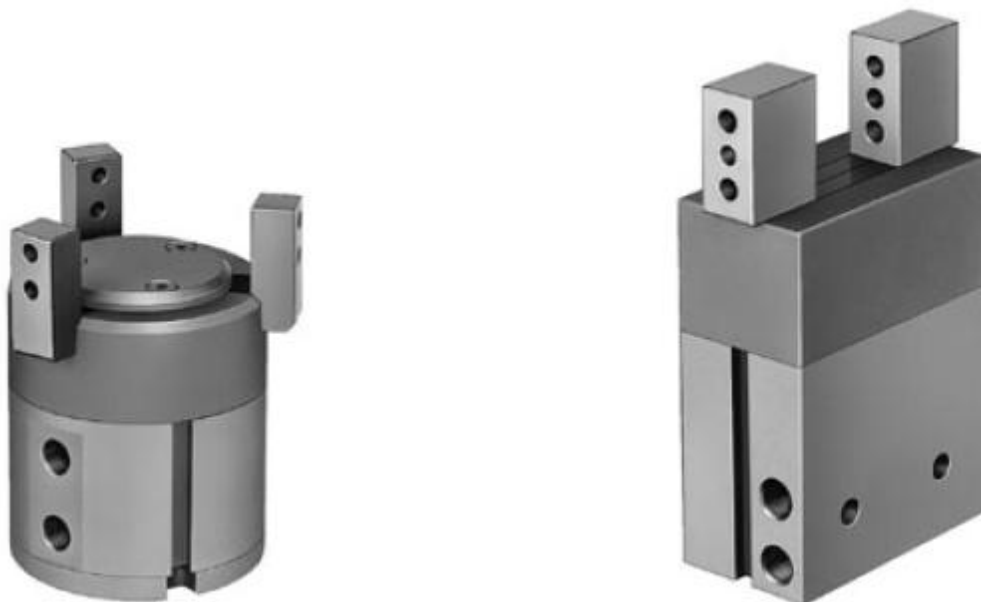
Слика 6.4. Пнеуматски вентил [1]

Постоји неколико типова разводника. Најчешће се користе разводници са вентилима (слика 6.4.). Код разводника са вентилима, вентил се покреће мембраном која се излаже деловању регулационог сигнала, а у првобитни положај се враћа помоћу опруге.



Слика 6.5. Пнеуматски разводници. [1]

Примена пнеуматских погона је веома широка тамо де се не траже велике силе због њихове једноставне конструкције, простог одржавања и ниске цене. Примена пнеуматике се среће и код хваталке робота, а неки од примера су дати на следећој слици.



Слика 6.6. Пнеуматске хваталке

6.3. Хидраулични погони

Ови погони раде на бази компримованог уља. Хидрауличним погоном могуће је остварити високе притиске у цилиндру, а тиме и велике силе у глобовима робота. Овај погон има ограничену максималну брзину клипа у цилиндру па је из тог разлога ограничена и брзина робота. Као код пнеуматских система, хидраулично регулисани системи се састоје од извора енергије (пумпе), хидрауличних водова, разводника и самог актуатора (тј. линеарног или обртног клипа у роботима). Главна разлика је у чињеници да разводник може бити пропорционално регулисан и на тај начин омогућава конвенционалну употребу хидрауличких серво – система, док код пнеуматских система разводник ради на принципу “укључено – искључено”.

Постоје три типа линеарних цилиндара:

- клип једноструког деловања,
- клип двоструког деловања и
- диференцијални клип

Код цилиндра једноструког деловања, развијена сила је једносмерна а повратни уређај (нпр. опруга) осигурава повратак осовине клипа у почетни положај.

Клип двоструког деловања има две коморе у којима се притисак p_1 и p_2 може наизменично одређивати. Треба обратити пажњу да присуство клипне осовине само у једној комори значи да је клип асиметричан у односу на притисак који је потребан да се добије исто кретање надесно и налево.

За дуги ход клипа користи се диференцијални клип. Попречни пресек с осовине клипа једнак је половини површине тела клипа S , односно $S = 2s$.

Развијена сила је: $F = s(2p - p_a)$

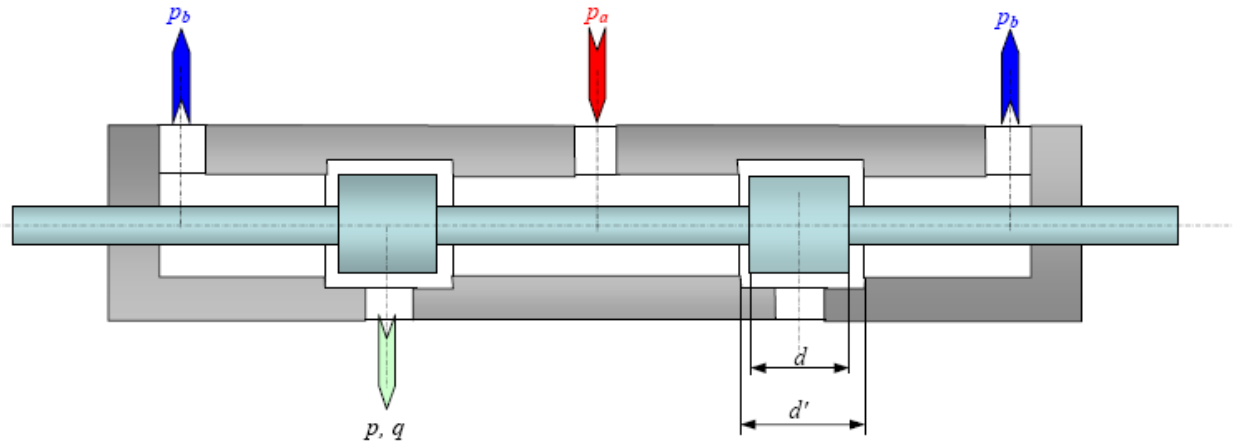
6.1.[1]

Као то је случај са пнеуматским клиповима, могуће је на механички начин трансформисати линеарно кретање хидрауличног клипа у обртно кретање. Постоји, међутим тип клипа који је направљен да ротира. То је обртни клип.

Најједноставнија верзија састоји се од цилиндра са фиксним затварачем. Унутар њега обрће се мобилни затварач који чини целину са излазном осовином. Ход клипа је ограничен димензијама затварача на око 330° .

Поред обртног мотора (пумпе) постоје још аксијалноклипни, радијалноклипни и зупчасти хидраулични мотори (пумпе).

Разводници су у ствари вентили који преспајају водове између извора напајања и радних јединица. Тип разводника дефинисан је бројем прикључних места и бројем радних положаја.



Слика 6.7. Хидраулични разводник [1]

Типичан пример разводника приказан је на слици 6.7. Улога овог разводника је да се мери проток q који улази у комору са познатим притиском $(p_a + p_b/2)$. Као што је приказано на слици 6.7. клиповим дужине d подешава се отвор дужине d' , а могу се оијавити три различите ситуације: $d = d'$ (разводник без истицања или повраћаја), $d > d'$ (разводник са повраћањем) и $d < d'$ (разводник са истицањем).



Слика 6.8. Хидраулични разводници

Серво-вентил је уређај који покреће клип разводника тако што открива коморе, прилагођавајући брзину протока пропорционално електричном регулационом сигналу. Ово је од битне важности за хидроуличку серво – регулацију. Хидраулички серво вентил је сложен уређај којег карактеришу много параметара.

Најважнији параметри су:

- повећање протока или однос између протока кроз вентил и регулационе струје без икаквог оптерећења (краткоспојни оперативни отпор);
- повећање притиска или однос између разлике притиска и регулационе струје када су отвори затворени;
- криве (карактеристике) проток – притисак или однос између протока и разлике притиска када је струја константна.

6.4. Електрични погони

Електрични погон робота први пут је увела шведска фирма ASEA 1974. године. Од тада се електромотори све чешће користе као погони робота. Предност коришћења електромотора је свеопшта присутност електричне енергије, једноставност прикључака, управљање које је лагано, тачно и поуздано. Шум ових мотора је веома мали као и загађење које је сведено на нулу.

Недостатак ових мотора је неповољан однос снаге и тежине. Код електромотора обавезна је примена магнетских материјала који повећавају тежину мотора. Један од проблема је прегрејавање мотора које настаје услед високе густине струје и магнетног флукса. Електромотори су опасни за рад у експлозивним срединама. Може се користити било који тип мотора, али данас се у роботизи користе следећи типови мотора:

- једносмерни мотори;
- наизменични мотори и
- корачни мотори.

6.4.1. Мотори једносмерне струје (DC мотори)

Задњих година управо су једносмерни мотори заузели водећу улогу у аутоматизацији и регулацији јер имају пуно предности у брзини и финоћи регулације брзине обртаја.

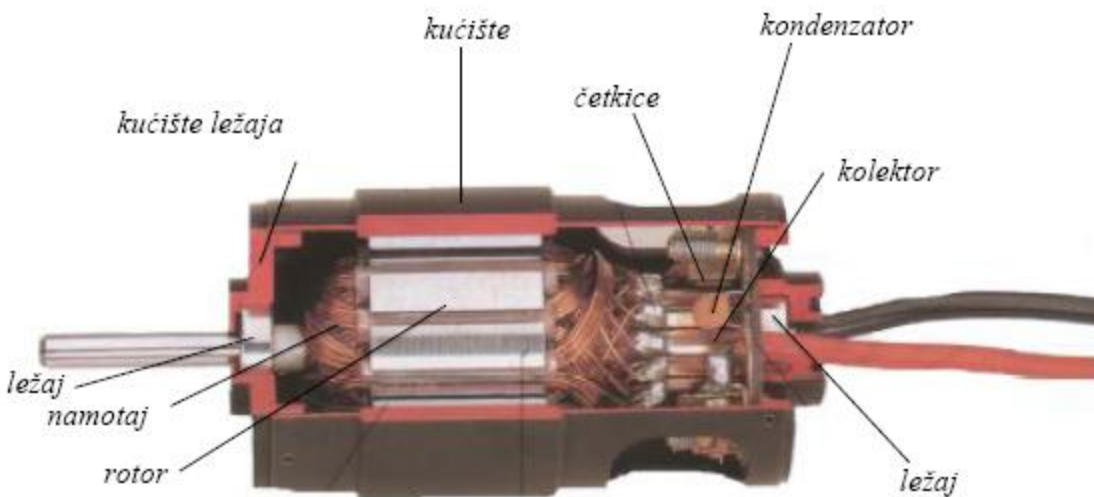
Једносмерни мотори се састоје из:

- статора,
- ротора,
- колектора.

Статор је изведен као шупљи ваљак од ливеног железа. На унутрањој страни статорског јарма налазе се магнетни полови са побудним намотајима, а са стране статора налазе се штитови са лежајевима за осовину. Магнетне линије сила излазе из северног Н – пола. Статор је израђен од пуног масивног комада јер је изложен деловању магнетног поља једносмерне струје па немамо губитке услед вртожних струја и хистерезисне петље.

Ротор је израђен од динамо лимова и учвршћен на осовину. У статору се налази арматурни намотај чији су крајеви спојени са ламелама колектора. Колектор је смештен у сам ротор на осовину мотора, а састоји се од бакарних ламела које су међусобно изоловане и изоловане од осовине, а по њима клизе четкице.

Четкице су начињене од мекшег материјала него што је колектор. Најчешће се за њихову израду користе тврди угаљ, графитни угаљ, метални угаљ итд. Оне морају читавом својом површином лежати на колектору одређеним притиском и не смеју бити веће ширине од 2 – 3 ламеле.



Слика 6.9. Приказ конструкције једносмерног мотора [1]

6.4.2. Електромотори наизменичне струје (АС мотори)

Постоје две врсте електромотора наизменичне струје:

- асинхрони и
- синхрони

Ови мотори имају добре погонске карактеристике, али су се због теже регулације броја обртаја мање употребљавали у роботизи. Развој електронике у последње време омогућио је развој нових серво мотора наизменичне струје који имају добру регулацију броја обртаја.

Асинхрони мотори се претежно употребљавају као мотори а ређе као генератори. Асинхрони мотор је добио своје име због тога што брзина ротационог магнетног флукса и брзина ротора није иста, као што је то случај код синхроних мотора. Тај ефекат се назива клизање. Асинхрони мотори могу бити једнофазни и трофазни а масовност њихове израде обезбеђује релативно ниску цену израде. Рад асинхроног мотора је заснован на принципу ротирајућег магнетног поља.

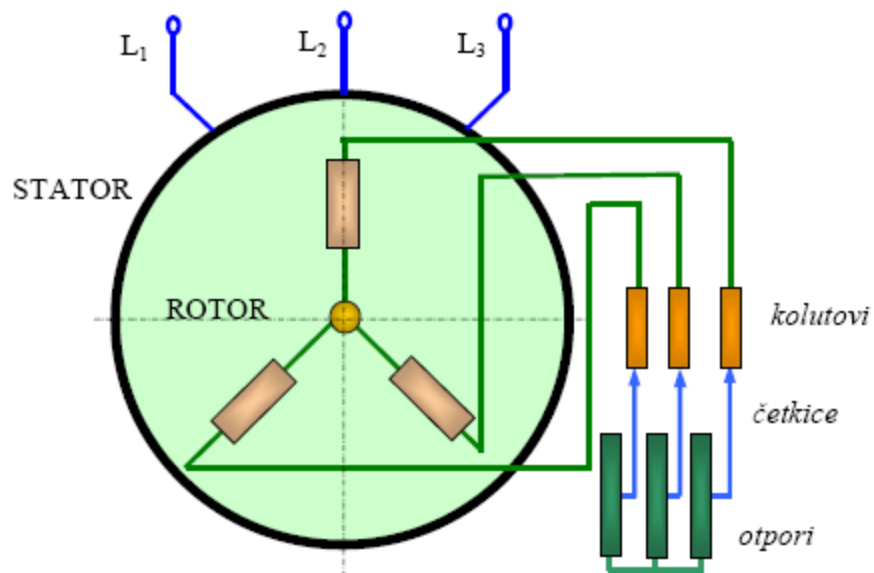
Статор је направљен у облику шупљег ваљка од динамо лимова, а уздуж ваљка на унутрашњој страни налазе се канали у које се ставља трофазни намотај. Кућиште мотора служи као носач и заштита лимова и намотаја, а израђује се од ливеног гвожђа, челика, силумина итд. У средини се налазе штитници лежача у облику поклопца где су смештени лежачеви за осовину на којој се налази ротор.

Ротор је састављен слично као и статор а састоји се од осовине и роторског пакета. Ротор је изведен у облику ваљка од динамо лимова, а у уздужном смеру, на спољашњој страни налазе се жлебови у које су смештени роторски намотаји. Ако је роторски намотај изведен од штапова бакра, бронзе, месинга или алуминијма, који су са обе стране прстеновима кратко спојени и личе на кавез, тада је то асинхрони мотор са кавезним ротором.

Прикључивањем статорског примарног намотаја на наизменичну трофазну мрежу потече трофаним намотајем трофазна наизменична струја, која ствара обртно магнетно поље које ротира брзином n_2 и затвара се кроз статор и роторски секундарни намотај. Пресецањем магнетних линија сила статорског и роторског намотаја ствара се индукована електромоторна сила ЕМС Е1 која држи равнотежу прикљученом напону мреже, а индукована ЕМС Е2 у намотају ротора индуковаће струју I_2 . Ова струја ствара механичке силе које на осовини стварају обртни момент.

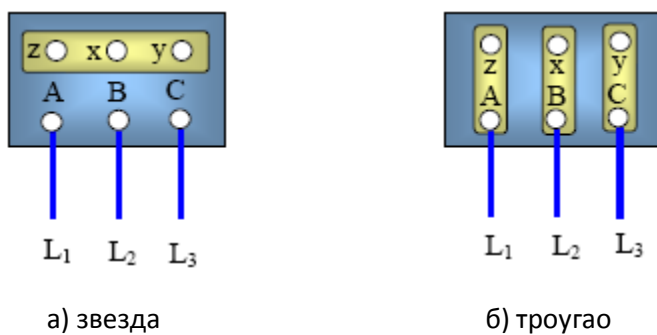
Смер обртања обртног магнетног поља и смер кретања ротора су истоветни. Уколико желимо променити смер окретања ротора, требало би променити смер обртног магнетног поља укрштањем двеју фаза.

Брзина ротора n увек је мања од синхроне брзине n_s . Ротор никада не може достићи синхрону брзину обртног магнетног поља



Слика 6.10. Клизно - прстенасти ахinxрони мотор [1]

Пуштање у рад асинроних мотора врши се помоћу система звезда – троугао као на слици 6.11.[1]



Слика 6.11. Спој намота [1]



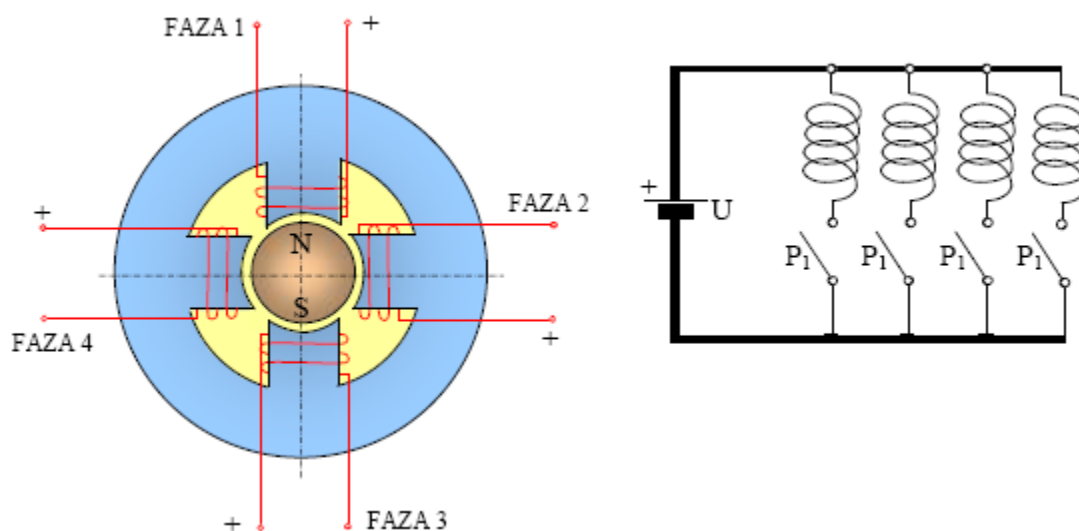
Слика 6.12. Мотор наизменичне струје [1]

6.4.3. Корачни мотори

Корачни мотор је посебна врста мотора којом се веома лако управља преко рачунара. Веома су слични синхроним моторима.

Могу бити са ротором:

- од сталног магнета,
- од меког гвожђа, или
- са намотајима и четкицама.



Слика 6.13. Попречни пресек четворофазног корачног мотора са шемом управљања [1]

Према броју фаза могу бити: двофазни, трофазни, четворофазни или петофазни. Број корака на пуном кругу зависи од конструкције, а креће се од 10 до 500 корака. Праве се за снаге од неколико W до неколико kW.

Корачни мотори имају велику предност над другим врстама у процесима који се контролишу уз помоћ рачунара. Поседују високу тачност позиционирања па су незаменљиви у применама у којима је тачност од великог значаја.

Обртање корачног мотора састоји се из великог броја корака. Колико корака има у једном пуном обртају ротора зависи од саме конструкције мотора.

Важне особине корачних мотора су:

- тачност позиционирања без повратне спреге коришћењем потребног броја управљачких импулса,
- велики обртни момент при малим угаоним брзинама, па и код појединачних корака,
- велики момент држања у побуђеном стању.

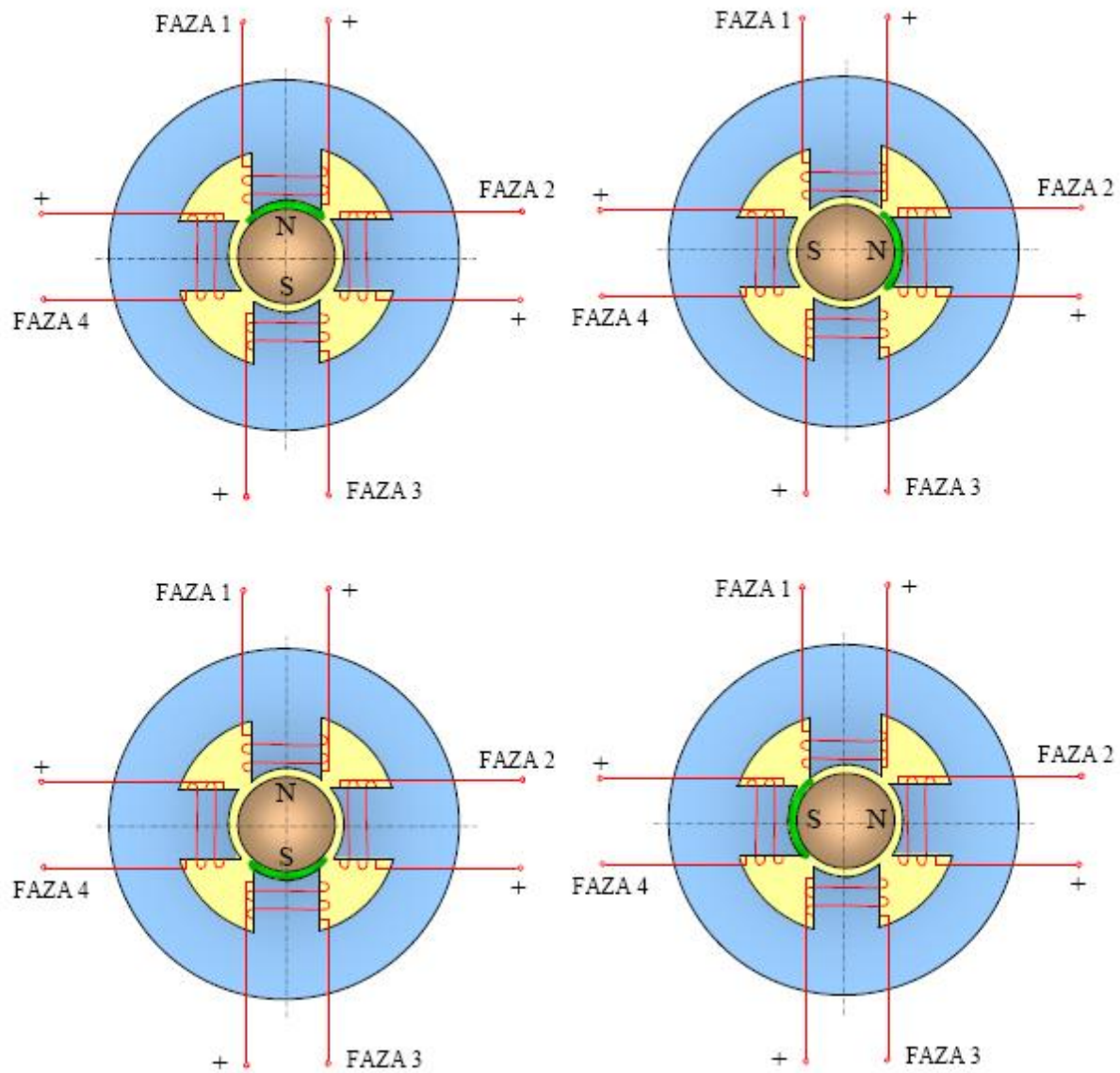
Принцип рада корачног мотора ће бити објашњен на примеру четворофазног мотора који је приказан на слици 6.14.[1]

Ротор мотора направљен је од сталног магнета цилиндричног облика, док статор има четири пола око којих се налазе намотаји. Електромагнетни момент настаје узајамним деловањем магнетних поља статора и ротора. Укључењем прекидача П1, С пол ротира и поставља се испод намотаја фазе 1. Ако се искључи П1, а укључи П2 ротор се окрене тако да му С пол буде испод намотаја фазе 2. Значи, ротор је направио угаони обртај од $\pi/2$.

На исти начин сукцесивним укључивањем П1, П2, П3 и П4 прави се померање од 2π . Супротним редоследом активирања прекидача мења се смер обртања мотора. Овакав начин корачања, код којег је у једном тренутку активан само један прекидач, зове се корачање пуним кораком.

Може се управљати полукоракком. У том случају, након побуде фазе 1 и постављање С пола ротора испод активне фазе, укључи се и П2 (заједно са П1). Тада ротор направи угаоно померање од $\pi/4$. Да би се постигао пун круг, прекидаче треба активирати следећим редоследом: П1 – П1П2 – П2 – П2П3 – П3 – П3П4 – П4 – П4П1 – П1.

Предност управљања полукоракком је дупло већа резолуција корачања, односно прецизност позиционирања ротора.



Слика 6.14. Корачање четворофазног мотора са сталним магнетом при побуди фаза редоследом 1 – 2 – 3 – 4 [1]

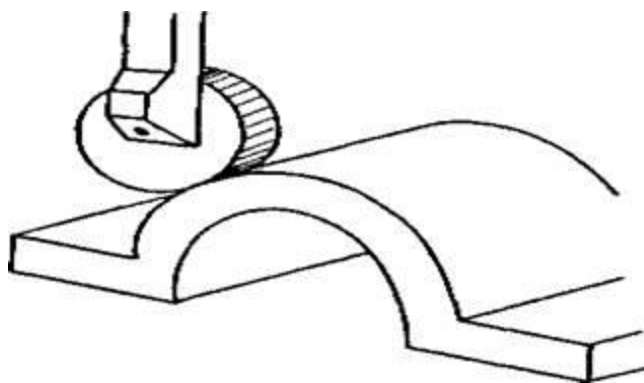


Слика 6.15. Корачни мотори[1]

7.0 Роботи за брушење и полирање

7.1 Брушење и полирање

Брушење је процес обраде резањем код кога се слој материјала скида у виду ситних опиљака брусним материјалом. Често се брушење користи ради уклањања неп-равилности или чишћења површина. Брусилаца се састоји од мотора на чију се излазну осовину монтира точак за брушење направљен од тврдог зрнастог материјала. На слици 7.1. приказан је уређај за брушење којим се уклањају неправилности на одливку, заостале после ливења у калупу.



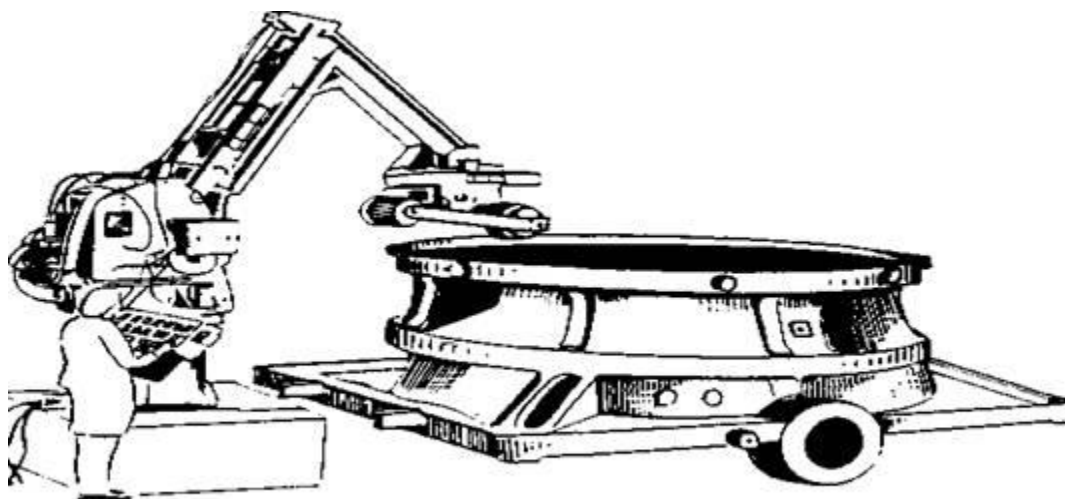
Сл. 7.1. Брушење [2]

Очигледно је да се брушење може извршити на два различита начина. У једном случају робот носи уређај за брушење и помера га тако да обезбеди брушење пред-виђених површина. Овај приступ је нужен када се ради о радним предметима већих димензија или тежина. На слици 7.2.а. приказано је брушење великог одливка, а на слици 7.2.б. обрада вара брушењем.

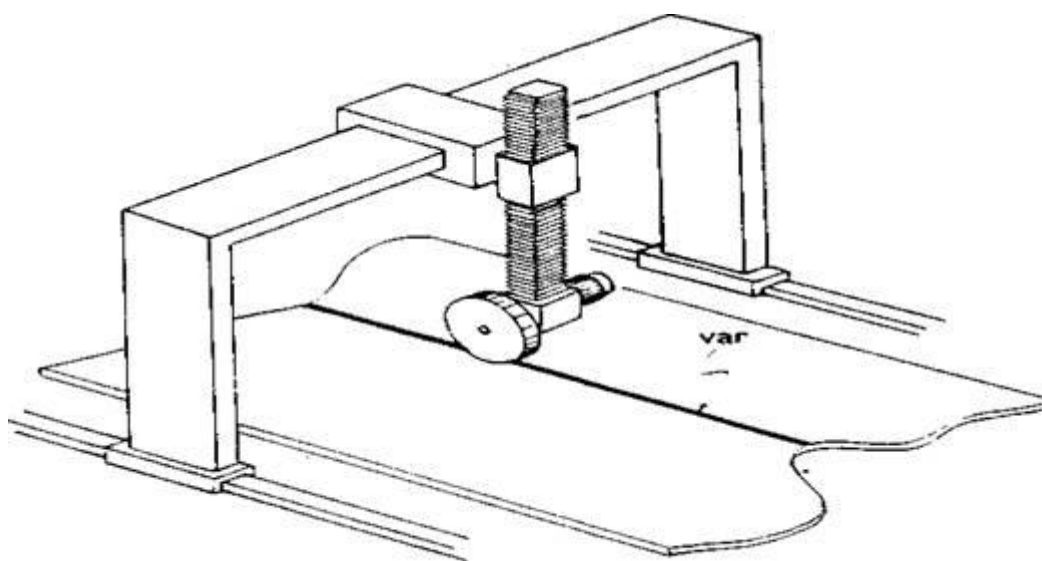
У другачијем приступу робот хвата радни предмет и приноси га машини тј. уређају за брушење који је фиксиран (сл. 7.3.). Ово је могуће када предмети нису велики, а посебно је погодно када предмет захтева обраду на више машина (нпр. резање, брушење и бушење). Тада се машине групишу око робота и добија се производна ћелија у којој се завршава читав низ обрада.

Полирање је поступак аналоган брушењу с тим што је точак за полирање направљен од материјала који уклања само ситне неравнине на предмету, дакле, глача га.

Са становишта геометрије робота, задаци брушења захтевају 6 степени слободе, а са становишта управљања, главни проблеми јављају се у праћењу сложене континуалне путање и остваривању захтеване силе притиска на површину која се бруси. Допунски проблем уносе вибрације које су увек присутне при брушењу.

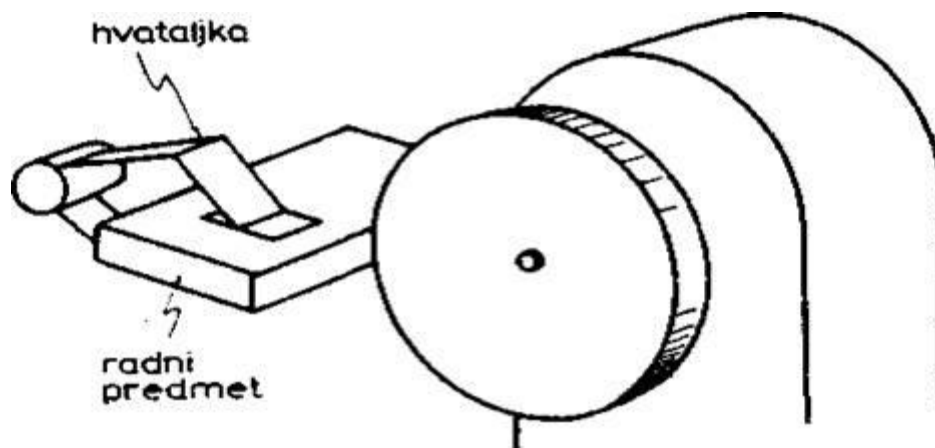


(a)



(b)

Сл.7.2. Брушење великог одливка и обрада вара брушењем [2]



Сл. 7.3. Фиксирана бруслица [2]

7.2 Брушење и полирање у ланцу производње

Брушење и полирање представљају стандардне операције у машинској обради. Оне су аутоматизоване помоћу индустријских робота, како би се човек ослободио тешких задатака, непријатних окружења а профитабилност производње повећала посебно у индустрији санитарне опреме. Међутим, познати системи данашњице су прилагођени на прилично скуп начин геометријама радних делова па због тога економска исплативост је само за великосеријске производње. Честа промена програма и ситемских параметара робота повећава време циклуса и трошкове целог процеса производње. Овај проблем ће бити изузетно изражен када је површина слободно обликована и са изузетно компликованим геометријским облицима.

Ово поглавље описује роботски систем који је специјално развијен за брушење и полирање слободно формираних површина уз висок квалитет и високу ефикасност захваљујући примени иновативних технологија робота, технолошких симулација и вештачке интелигенције. Роботски систем комбинује неколико различитих нивоа аутоматизације, мануелни рад, делимичну аутоматизацију и потпуну аутоматизацију. Висококонтролни послови биће урађени потпуно аутоматизовано на пример детектовање грешке на површини радног комада у оквиру производног процеса. Неки модули су делимично аутоматизовани у сиљу помагања операцији планирања распореда и дизајнирању програма. За операције које се ређе јављају степен мануелних грешака биће смањен. Смањен степен мануелног рада може одржати ниску цену роботског система који је прихватљив за предузеће. Роботски систем је флексибилан и пролагодљив производњи малог и средњег обима што је тежак задатак за садашње роботски контролисане системе за брушење и полирање.

Аутоматизација ових роботских система фокусирана је на два аспекта. Први од њих је осигурање квалитета, а други, производни модел који предлаже избор техничких параметара потребних за висок квалитет обраде. Да би се постигао висок степен квалитета површине, роботски систем би требало да поседује прецизније програме кретања у оптимизацији процеса. Новији софтверски

системи су развијени управо за ту сврху. Софтвер помаже оператеру да дизајнира путању брушења и полирања прецизније и ефикасније са ЦАД подацима са брушене односно полиране површине. Поред тога симулација процеса брушења ће помоћи оператеру да добије разумније производне путање и усвоји оптималне параметре у циљу добијања површина са високим квалитетом. Модел процеса специјално за процес брушења проучава однос између различитих параметара брушења и коначног резултата уклањања материјала са површина радног комада.

Резултати модела процеса чине симулацију процеса брушења могућом. Оператор може квалитативно анализирати каква је била површина пре брушења. Ово може наложити оператеру да модификује путању брушења унапред па самим тим смањити цену производних процеса.

Циљ процеса брушења и полирања је да побољша тачност форме и димензија као и завршну обраду површине. Оба процеса играју важну улогу у самој завршници ланца обраде где грешке у самом процесу воде до великих издатака по јединици производа и појаве шкарта. Специјални у индустрији санитарних фитинга брушење и полирање се широко користе за производњу слободно обликоване површине. Полу готов радни комад је произведен ливењем. Кроз касније брушење и полирање добија се високо-квалитетна сјајна површина. У овом случају димензиона тачност радног комада игра споредну улогу. На слици 7.4. илустровано је пет фаза производње славине за воду из грубог комада у финални производ.



Слика 7.4. Степени рада у производњи опрема 1) Изливање, 2) Брушење, 3) Полирање, 4) Главанско покривање метала, 5) Крајњи производ. [3]

Традиционални процес брушења и полирања сваке слободно обликоване површине се заснивао на примени мануелног рада. Радник држи радни комад у рукама и на машини за полирање сам на основу свог искуства одлучује о радној путањи обраде (видети слику 7.5.). У овом производном процесу радник се сусреће са окружењем које може бити штетно по његово здравље, на пример честице металне прашине у ваздуху и превелика бука. Поред тога посао је тежак и монотон и не може се постићи константност квалитета производа јер радник не може бити концентрисан на посао дужи временски период. Данас индустријски роботи су увођењем у производњу слободно обликованих површина брушењем и полирањем веома смањили цену производа и оптимизирали квалитет. Робот замењујући снагу човека држи радни комад и помера га по путањи обраде која је предвиђена техничком литературом (слика 7.5.б). За спровођење овог процеса коришћењем робота, најважније је испланирати брусно-полиране путање и генерисати их у програм робота.

Други практични проблем који ће бити решен је појава грешака у претходној фази ливења. Процес ливења карактерише висок степен димензионалних и геометријских одступања као и квалитет промене пукотина и пора. Ове снажне промене почетног стања брушења воде ка нерентабилној стопи шкарта и великој ручној процедури тестирања сваког комада у аутоматизованом процесу брушења и полирања. Оно што је теже за реализацију примене аутоматског решења је чињеница да су грешке видљиве након fine обраде делова и да је теже мерење осетљивих и јако светлећих површина.



а)



б)

Слика 7.2. Процес ручног брушења и брушење помоћу робота [3]

Робот данас помаже при решењима аутоматике највише на пољу брушења и полирања санитарне опреме. Профитабилност ових система је расла у протеклим годинама упркос светској економској кризи. Са предностима у глобализацији тржишта суочени смо са великом конкуренцијом која долази из сиромашних земаља у којима се брушење и полирање изводи ручно. Постоји реална тенденција да се ови завршни процеси обраде раде у земљама где је јефтинија радна снага. Цена укупног процеса производње би требало да се смањи при суочавању са глобалном конкуренцијом. Међутим, велики временски интервал и цена коштања за програмирање и оптимизацију има негативне ефекте по профитабилност индустријских робота који су саставни делови ћелија за брушење и полирање. Упоредјујући са задацима конвенционалних робота ови високи захтеви произилазе из јасно сложених свеобухватних и прецизних покрета робота.

Ови захтеви могу имати наравно и много негативних утицаја ако је често потребно ново програмирање или прилагођавање програма. Главни разлози за то су промена величине серија са различитим изменама, разна одступања толеранције и друге грешке у текућем процесу проиводње. Потребан ниво аутоматизације поступака зависе од дешавања учестаности потребе за послом оптимизације. За ретка дешавања процесних сметњи мануелна дешавања су довољна, док за већу фреквенцију појаве пуна аутоматизација мора бити реализована. Технике развијене за ручну употребу се знатно разликују од потпуно аутоматизованих. У фокусу ручне процедуре лежи

ефикасност интеракције са оператором будући да потпуна аутоматизација захтева развој и интеграцију комплексних метода мерења, процесуирања података и контроле процеса.

7.3. Иновативни роботски системи

Један аспект овог пројекта има за циљ будући развој процеса специфичних *offline* програмских система, како би се обезбедила боља оптимизација процедуре и виши степен ефикасности него што је то случај код ручног програмирања. Данашњи системи су дизајнирани за универзалну употребу и слични су комплексним 3Д CAD-системима, што се тиче њихове структуре и операција. Процеси којима није потребна накнадна оптимизација параметара и путања, као што су палетизирање, монтажа, или лакирање могу бити програмирани веома ефикасно са оваквим софтверским системом. Међутим, не постоје одговарајућа средства на располагању што се тиче брушења и полирања која би могла да оптимизују производне фазе директно на роботском елементу.

Употреба конвенционалних *offline* програмских система при брушењу и полирању обично је неуспешна због комплексности у повезивању, нестручности оператора као и због недостатка специфичних процесних функција. Због велике потражње робе широке потрошње у чијој производњи су завршне операције брушење и полирање, потребно је развити систем који би требало прилагодити малим величинама серија и честим изменама улазних параметара. Оператер робота је у центру доношења одлука и он даје PC бази смернице за следећи корак, и бира програмске алате за ефикасну оптимизацију програма.

Још један аспект, лежи у разматрању утицаја сметњи (ометања) које се често појављују током производног процеса и које морају аутоматски бити детектоване и компензоване. У пракси, најчешћи утицај сметњи потиче од постојећих недостатака (дефеката) на полуфабрикату после фазе ливења или директно насталог у процесу брушења.

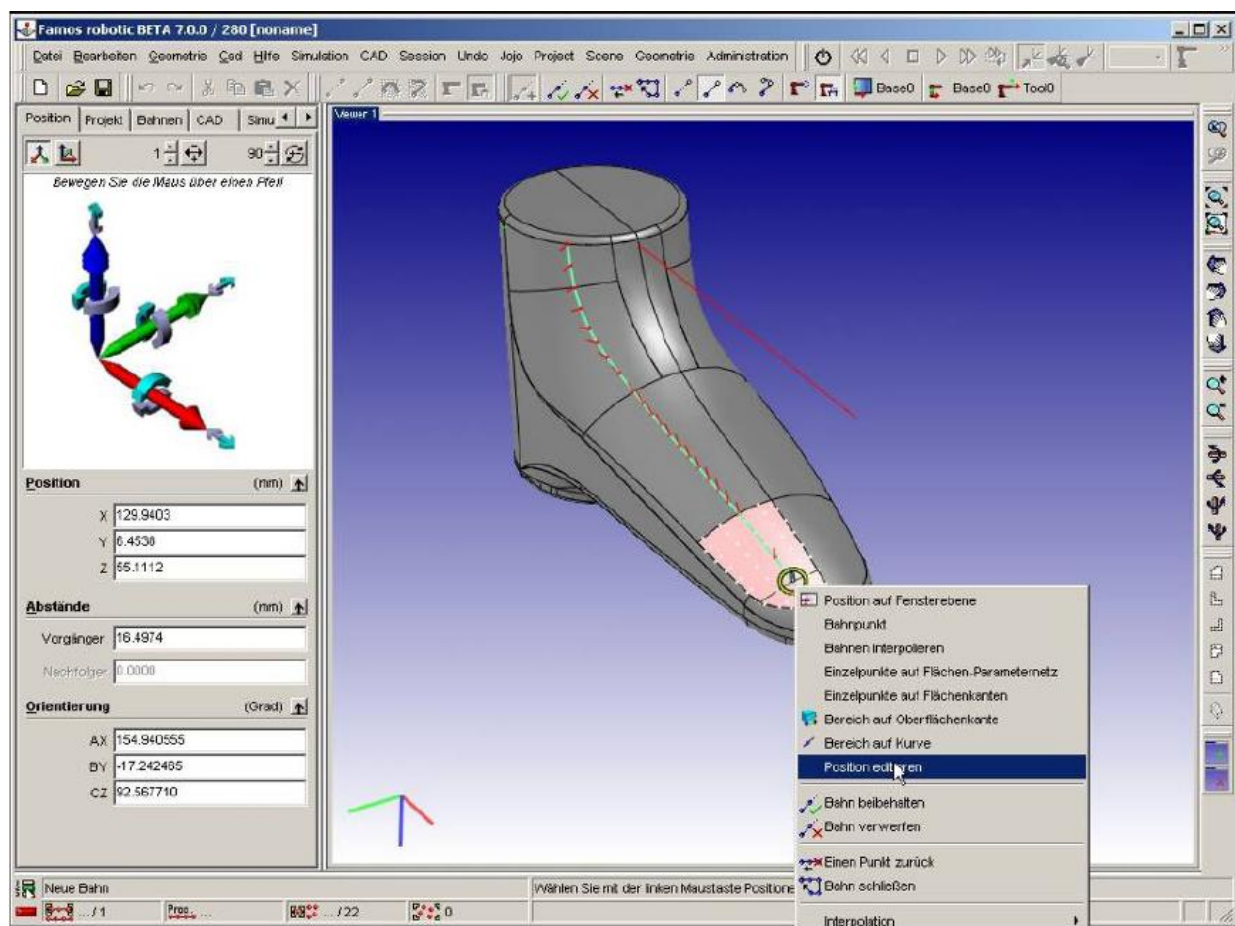
Стога, откривање грешака и класификација, као и извођење стратегије оптимизације параметара кроз методе мерења и контролу процеса морају бити реализоване аутоматски.

Софтвер система је развијен за радионичко програмирање роботских система који обезбеђују интуитивно операбилни графички 3Д кориснички интерфејс. Софтвер обезбеђује специфичну оптимизацију алата радног процеса, специјално алата за брушење и полирање. Софтвер прихвата CAD модел радног комада или изглед његове спољашње површине као улаз и помаже оператору да лакше генерише путање брушења и полирања на згодан и практичан начин. Софтвер има могућност генерисања корисничких програма, сходно намени робота.

Применом софтвера, време намењено дизајнирању (прорачунавању) путања је знатно смањено у односу на универзални *offline* програмски систем. Веома је погодан за серије мањег и средњег обима и флексибилан у односу на честе измене путања обраде радног комада. Слика 7.4 показује просто генерисање путања брушења на површини радног комада. Уз то софтвер је проширен

адаптивним консалтинг (саветним) центром за проналажење грешака, њихових узрока, стратегијом за њихово компензовање и интернет везом са базом података процеса „know-how“.

Софтвер попуњава празнину између мулти-функционалних, сложених, *offline* програмских система коришћених у одељењу за планирање и неефикасних могућностима контроле робота коришћеним од стране оператера за оптимизацију програма.

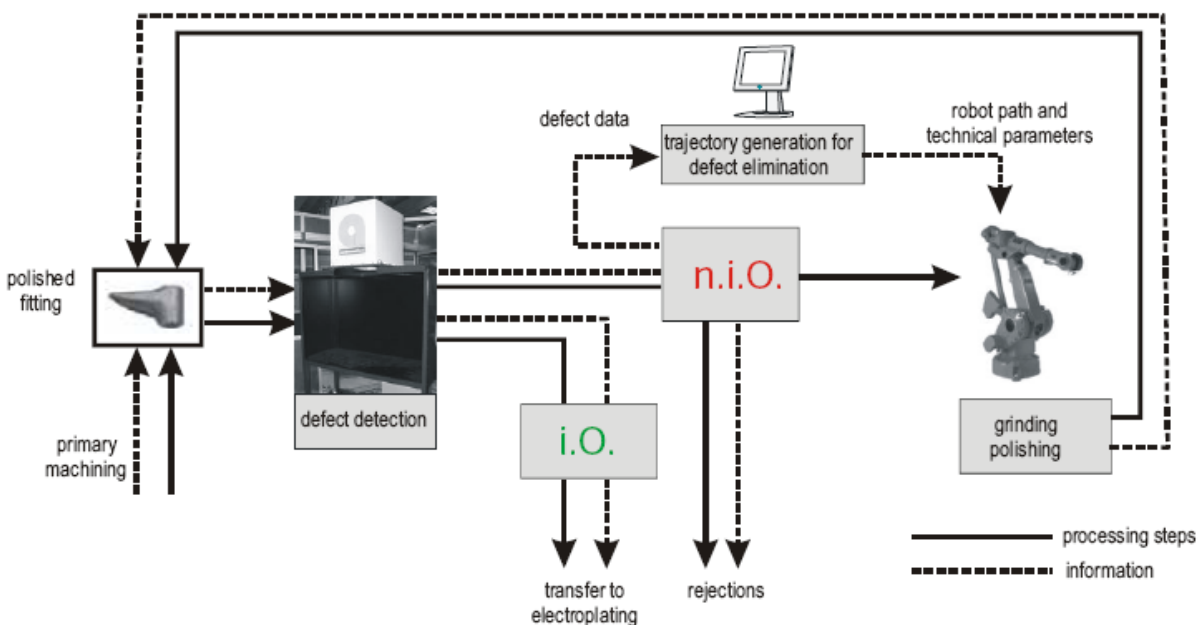


Слика 7.3.Offline програмирање и симулациони систем (Carat Robotic Innovation, 2004) [4]

Већа толеранција у односу на почетне услове који се односе на квалитет радног комада, постигнута је комбинацијом обраде слике процесног-мерног система, модела брушења и полирања, адаптивних техника котроле и интелигентних софтверских компоненетни. Видети и проценити грешке обраде на високосјајним површинама је веома тешко чак и за утренирано људско око.

Осим тога, нажалост, грешке у материјалу радног комада у производном ланцу грубог брушења, завршног брушења и полирања биће често детектоване тек након одрађеног корака обраде, или тек на крају самог процеса.

Још једна од препорука која доприноси потпуној аутоматизацији ланца производње помоћу индустријских робота нарочито оног дела производног процеса који се односи на брушење и полирање, је заснована на мерењима система за обраду слике тако да се добија оптимални квалитет површине упркос променљивим почетним условима. Слика 7.4 илуструје ток аутоматске детекције и класификације система. Централни хардвер представља затворени систем који може обезбедити одговарајуће осветљење и фотографисање површине радног комада. Софтвер система је оспособљен за проналажење позиције и класификацију дефеката путем анализе црно-белих фотографија снимљених помоћу видео система.



Слика 7.4. Дијаграм тока потпуно аутоматизованог ланца прозводње [4]

После полирања, радни комад је пребачен у видео систем на процену. Радни комад ће отићи на наредни корак обраде уколико се не детектују дефекти на површини радног комада. Радни комад који има непоправљиве дефекте биће одбачен или одбијен а остатак се бруси и полира према индивидуалним подацима дефеката. Преправљени радни комад се поставља поново на аутоматски видео систем све док се радни комад не прихвати као квалитетан или се одбацује као дефектан. Компензаторски процес за детектовање грешака обраде на површини радног комада је већ реализован у систему.



7.5. Примена робота у процесу брушења и полирања [1]

8.0 Закључак

Индустријски роботски системи представљају принципијелно нова техничка средства комплексне аутоматизације производних процеса који су развијену у сврху боље реализације послова непримерених човеку а све у смислу остваривања веће добити предузећа и олакшавања процеса рада људима уз велики степен њихове заштите.

Њиховим коришћењем могуће је у потпуности елиминисати људски рад по свим нивоима комплексности радних операција.

Због бољег квалитета компоненти робота, примене бољих решења повратних спрега, примене савремених материјала, смањења вибрација и повећања тачности, све је чешћа примена индустријских робота у технологијама обраде.

Роботи у производним технологијама се могу користити за опслуживање машина за обраду или у улози самих машина које врше обраду.

Као саставни делови завршних механизма индустријских робота, користе се као завршни уређаји, алати који служе за обраду материјала: бугрије, глодала...

Као пример је наведен роботски систем који врши брушење и полирање славина које се користе у домаћинству. Пошто је то роба широке потрошње а самим тим ради се о великим производним серијама, покушано је да се скрене пажња на примену робота у процесу брушења и полирања које као завршне операције које су се обављале ручно, чине крупну ставку при формирању цене завршног производа.

Све је већа примена симулационих софтвера који помажу бољем реализовању појединих фаза производних циклуса, што такође има за циљ повећање конкурентности на тржишту кроз смањење цене производа.

Роботи су наша неминовност, произашла из нужности за њима. Све је већа примена робота како у индустрији тако и у свакодневном животу. Њихов број из дана у дан расте и представља један реални параметар по којем се мери степен развојног домета сваког друштва.

9.0 Литература

- [1] Проф. др Влатко Долечек и Проф.др Исак Карабеговић: “Роботика” -Универзитетска књига (Бихаћ 2002)
- [2] Роботика и аутоматизација- <http://automatizacija1.etf.rs/poglavlja/Robotika%201.htm>
- [3] Munir Merdan: “Cutting Edge Robotics“ -Verlag Robert Mayer Scholz Mammendorf (Немачка 2005)
- [4] Blum, H; Suttmeier, F.T. (2000) An adaptive finite element discretisation for a simplified signorini problem. *Calcolo*, 37(2):65-77.
Blum, H; Schroeder, A; Suttmeier, F.T.(2003). A Posteriori Error Bounds for Finite Element Schemes for a Model Friction Problem. *Conference Proceedings of Simulation Aided Offline Process Design and Optimization in Manufacturing Sculptured Surface*, pp 39-47, Witten-Bommerholz, Germany.
Cabaravdic, M; Kneupner, K; Kuhlencoetter, B. (2003) Methods for efficient optimisation of robot supported grinding and polishing processes. *International Conference on „Trends in the Development of Machinery and Associated Technology“*, Barcelona, Spain.
Hammann, G.(1998) Modellierung des Abtragsverhaltens Elastischer Roboter-geführter Schleifwerkzeuge. PhD thesis, University Stuttgart.
Iivarinen J; Visa, A. (1998) An Adaptive Texture and Shape Based Defect Classification. In the *Proceedings of the 14th International Conference on Pattern Recognition*, vol. 1, pp. 117-122, Brisbane, Australia
Lampinen, J; Smolander, S. (1994) Wood defect recognition with self-organizing feature selection. *Intelligent Robots and Computer Vision XIII: Algorithms and Computer Vision*, Proc. SPIE 2353, pp. 385-395.
Kneupner, K. (2002) Directcontrol. Ein Programmierkonzept fuer Roboterzellen. In *Conference proceedings of Robotik*, Ludwigs-burg, Germany.
Kneupner, K. (2004). Entwicklung eines Programmier und Steuerungskonzepts fuer Robotersysteme auf der Basis eines Umwel-tmodells. PhD thesis, Dortmund
Koenig, W. (1996) *Fertigungsverfahren Band 2 --- Schleifen, Honen, Laeppen*. VDI Verlag.
Krause, R. H. (2001) Monotone Multigrid Methods for Signorini's Problem with Friction. PhD thesis, Freie University Berlin.
Kreis, W; Kneupner, K. (2001a). Ein Simulationsgerechtes Prozessmodell fuer das Freiform

Bandschleifen. Dortmund Germany.

Kreis, W; Kneupner, K. (2001b) Simulation des Bandschleifprozesses. Frontiers in Simulation, Simulationstechnik 15th. Symposium, pp 517-522,. Paderborn Germany.

Meyerhoff, M. (1998) NC-Programmierung fuer das kraftgesteuerte Bandschleifen von Freiform-flachen. PhD thesis, University Hannover.

Schueppstuhl, T. (2003) Beitrag zum Bandschleifen komplexer Freiformgeometrien mit dem Industrieroboter. PhD thesis, University Dortmund.

Suttmeier, F:T. (2001) Error Analysis for Finite Element Solutions of Variational Inequalities. PhD thesis, Dortmund University.