

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Jan Kramžar

Robotizacija preverjanja kakovosti zobniške gredi

Diplomsko delo visokošolskega strokovnega študija

Mentor: prof. dr. Roman Kamnik

Ljubljana, 2015

Zahvala

Pri izdelavi diplomske naloge se za strokovno pomoč zahvaljujem mentorju prof. dr. Romanu Kamniku. Zahvala gre prav tako sodelavcem iz podjetja Inea Rbt d.o.o, ki so mi pri realizaciji avtomatske kontrole preverjanja zobniških gredi zagotovili potrebno opremo za avtomatizacijo proizvajalca Mitsubishi electric. Iz zahvale pa ne smem izpustiti tudi svoje družine, ki mi je v času izdelave diplomske naloge vedno stala ob strani.

Vsebina

1	Uvod	5
2	Vstavljanje zobniške gredi v kontrolni kaliber z notranjim ozobjem	9
2.1	Oznake in parametri delov ozobja na gredi in notranjih ozobjih kontrolnega kalibra	9
2.2	Pogoji parametrov zobnikov za popolno prileganje	13
2.3	Postopek ročnega vstavljanja gredi v kontrolni kaliber	15
3	Teorija robotskega vstavljanja	18
3.1	Razlaga	18
3.2	Osnovne lastnosti industrijskih robotov	18
3.3	Problem vstavljanja čepa v luknjo	20
3.3.1	Definicija	20
3.3.2	Sile in momenti med vstavljanjem čepa v luknjo	22
3.4	Rešitve vstavljanja čepa v luknjo	25
3.4.1	Programirana aktivna voljnost brez uporabe senzorja sile (ang. <i>compliance control</i>)	27
3.4.2	Programirana aktivna voljnost z uporabo senzorja sile	29
4	Opis programske in strojne opreme	33
4.1	Industrijski robot RV - 4FLMQ	33
4.1.1	Robotska roka	33
4.1.2	Krmilnik CR-750-Q	35
4.1.3	Koordinatni sistemi	38
4.2	Učna enota R56TB	40
4.3	Programska oprema RTToolBox2	41

4.3.1 Programski jezik	42
4.4 Vgrajena funkcija za zagotavljanje programirane aktivne voljnosti robotske roke brez uporabe senzorja sile (ang. <i>compliance control</i>).....	46
4.4.1 Voljno gibanje z uporabo XYZ operacije (ang. <i>composition posture</i>)	47
4.4.2 Voljno gibanje z uporabo operacije orodja (ang. <i>composition tool</i>).....	48
4.4.3 Voljno gibanje z uporabo osne operacije (ang. <i>composition joint</i>).....	49
4.4.4 Togost robotske roke pri voljnem gibanju	49
4.4.5 Delovanje funkcije za zagotavljanje programirane aktivne voljnosti robotske roke brez uporabe senzorja sile.....	50
4.5 Oprema za zagotavljanje programirane aktivne voljnosti robotske roke z uporabo senzorja sile	51
4.5.1 Senzor sile 1F-FS001-W200.....	52
4.5.2 Namenski krmilnik 2F-TZ561	53
4.5.3 Programska uporaba opreme za zagotavljanje programirane aktivne voljnosti robotske roke z uporabo senzorja sile	54
5 Robotska celica za avtomatsko vstavljanje	56
6. Robotsko vstavljanje gredi v prvi kontrolni kaliber	60
6.1 Postopek robotskega vstavljanja v prvi kaliber	60
6.2 Razvoj programa za vstavljanje z uporabo vgrajene funkcije.....	64
6.2.1 Nastavitev parametrov togosti vgrajene funkcije na podlagi opravljenih meritev sil in pozicij robotske roke	70
6.3 Razvoj programa za vstavljanje z uporabo senzorja sile.....	72
6.3.1 Nastavitev parametrov senzorja sile na podlagi opravljenih meritev sil in pozicij robotske roke	73
6.4 Delovanje uporabljenih rešitev	73
7 Končna kontrola zobniških gredi	75
8 Zaključek	77
9 Literatura	79

Povzetek

V diplomskem delu je predstavljena robotizacija naloge preverjanja kakovosti zobniške gredi. Opisane so zahteve, rešitve in problematika robotskega vstavljanja gredi v kaliber. Delo preverja izvedljivost robotizacije na podlagi dveh rešitev in sicer programirana aktivna voljnost robota brez uporabe zunanjega senzorja sile in programirana aktivna voljnost robota z uporabo zunanjega senzorja sile. Postopek je obsegal izdelavo robotske celice in razvoj ter testiranje robotskih programov za avtomatsko vstavljanje gredi v kontrolna kalibra. V delu so podane meritve in rezultati testiranj ter ugotovitve o predlaganih rešitvah.

Ključne besede: preverjanje kakovosti zobnikov, problematika robotskega vstavljanja, programirana aktivna voljnost robota, robotska celica

Abstract

The thesis presents the robotization of checking the quality of gear shafts. It describes the requirements, solutions and the problem of robotic insertion of shafts into a caliber. The work verifies the feasibility of robotic insertion on the basis of two solutions that are robot active compliance control without the use of external force sensor and robot active compliance control using external force sensor. The process included the manufacture of a robotic cell and the development and testing of robot programs for automatic shaft insertion in the control calibers. In the work there are also given measurements and test results, and the conclusions of the proposed solutions.

Keywords: checking the technical quality of gears, the problem of robot insertion, robot active compliance control, robot cell

1 Uvod

Današnji roboti so od svojih začetkov precej napredovali in so postali nepogrešljiv del industrije, saj jih odlikuje visoka fleksibilnost, vzdržljivost, hitrost in preciznost. Njihovo delo vključuje vse od varjenja, spajkanja, barvanja in sestavljanja do zlaganja. V zadnjem času se je njihov obseg dela premaknil od montažnih procesov tudi do preverjanja kakovosti.

Preverjanje kakovosti je ključno pri izdelkih, ki so pomemben sestavni del nekega večjega sestava ali produkta, zlasti če slab izdelek posredno ali neposredno vpliva na varnost človeških življenj. Tako preverjanje je prisotno v avtomobilski industriji, ki je znana po strogih varnostnih zahtevah izdelave. Primer tega je kontrola volanske zobniške gredi, pri kateri je potrebno preverjanje kakovosti proizvedenih zobnikov na gredi. Glede na [1] so zobniki in zobniške dvojice vedno izdelane z večjimi in manjšimi napakami (odstopanja); tako se izognemo zataknitvi (ang. *sticking*) in napakam pri izdelavi, montaži, segrevanju zobniških gonil, itd. Da želeno zobniško gonilo še vedno ustreza specifikacijam, morajo biti vsa odstopanja v dopustnih mejah. Treba je kontrolirati določene merilne veličine. Obstaja več vrst teoretičnih kontrol za preverjanje ravnobnih valjastih zobnikov. Te so: kontrola razdelka, kontrola bočnice in bočne slednice, kontrola krožnega teka, tangencialna in radialna kontrola z ubiranjem, kontrola debeline zoba, kontrola bočnega razstopa, kontrola slike nošenja in kontrola zobnikovega telesa.

Zaradi izdelave zobnikov na gredi, ki temelji na postopku kotalnega rezkanja, sta v našem primeru potrebni kontrola debeline zob in kontrola fizičnih poškodb zobnikov. Pri kontroli debeline zob imamo več različnih veličin merjenja; pri tem je izhodiščna

veličina imenska debelina zoba, ki je ločna dolžina med levim in desnim zobnim bokom v normalnem prerezu. Potem sledi tetivna debelina zob, tj. najkrajša razdalja med levim in desnim zobnim bokom na opazovanem premeru kontroliranega zobnika.

V strojništvu imamo za opravljanje kontrol na voljo več vrst ročnih merilnih in kontrolnih orodij, kot so na primer kljunasto merilo in mikrometer. Kontrole s takimi orodji so zlasti pri masovni proizvodnji zelo zamudne, kot denimo kontrola debeline zob zobnikov, kjer je s kljunastim merilom treba meriti vsak zob posebej. V praksi se po navadi zaradi hitrejšega preverjanja uporabljajo tudi ročna orodja, kot sta kontrolni trn ali kontrolni kaliber. V osnovi so to obroči z znano mero, v katere vstavljamo kontrolirane izdelke. Tako hitreje ugotavljamo ustreznost mer izdelkov. Na tak način lahko tudi preverjamo ustreznost izdelanih zobnikov, saj so na voljo tudi kalibri za ozobljenja. Pri avtomatizaciji je na razpolago veliko število namenskih računalniško vodenih obdelovalnih strojev, imenovanih CNC stroji, ki izvajajo popolnoma avtomatski pregled zobnikov na podlagi nekaterih prej omenjenih teoretičnih kontrol. Vendar so te naprave zaradi svoje specifičnosti cenovno neugodne. Zato predlagamo kontrolo debeline zob in večjih poškodb na naslednji način: zobniške gredi vstavljamo v kontrolni kaliber, vstavljanje pa avtomatiziramo z industrijskim robotom, kot je opisano v naslednjem odstavku.

Montažne naloge industrijskih robotov so se v zadnjih letih povečale tako v številu kot kompleksnosti, in to pomeni tudi večje število malo tolerančnih, zelo preciznih vstavljanj, ki so težavna tudi za ročno sestavljanje. Diplomaska naloga obravnava poizkus izdelave robotske celice za avtomatsko vstavljanje gredi v kontrolni kaliber. Industrijski robot bi opravljal nalogo preverjanja kakovosti po principu montažnega procesa. Pri tem pridemo do temeljnega problema robotske montaže, ki je opisan kot problem vstavljanja čepa v luknjo.

V svetu industrijske robotike so se pojavile različne rešitve, vezane na omenjeno problematiko montažnih procesov. Prva teh rešitev je pasivna mehanska naprava, ki je nameščena med prirobnico robota in prijemala ter ima možnost stranskega in

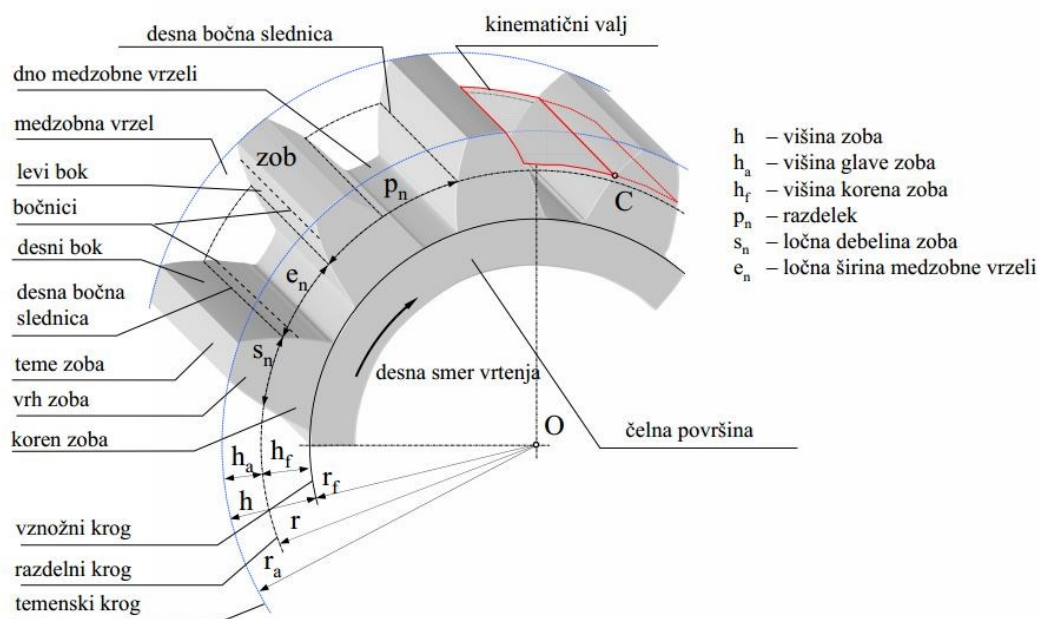
rotacijskega gibanja. Drugi dve rešitvi delujeta po principu aktivne voljnosti robota, in sicer brez uporabe zunanjih senzorjev sil (ang. *compliance control*) ali pa z uporabo zunanjih senzorjev sil (ang. *force sense*) [3].

V drugem poglavju diplomska naloga obravnava problematiko ročnega vstavljanja zobniške gredi v kontrolni kaliber. V tretjem poglavju se usmeri v problematiko robotskega montažnega procesa ter predlaga dve rešitvi, vezani na zaznavanje in preprečevanje prekomernih sil interakcije robota. V četrtem poglavju je opisana oprema za avtomatizacijo, uporabljena pri izdelavi robotske celice, opisane v petem poglavju. V šestem poglavju je zajet postopek robotskega vstavljanja in razvoj ter testiranje programov za vstavljanje. Sedmo poglavje obravnava končno kontrolo zobniških gredi, osmo poglavje pa je namenjeno zaključnim mislim.

2 Vstavljanje zobniške gredi v kontrolni kaliber z notranjim ozobjem

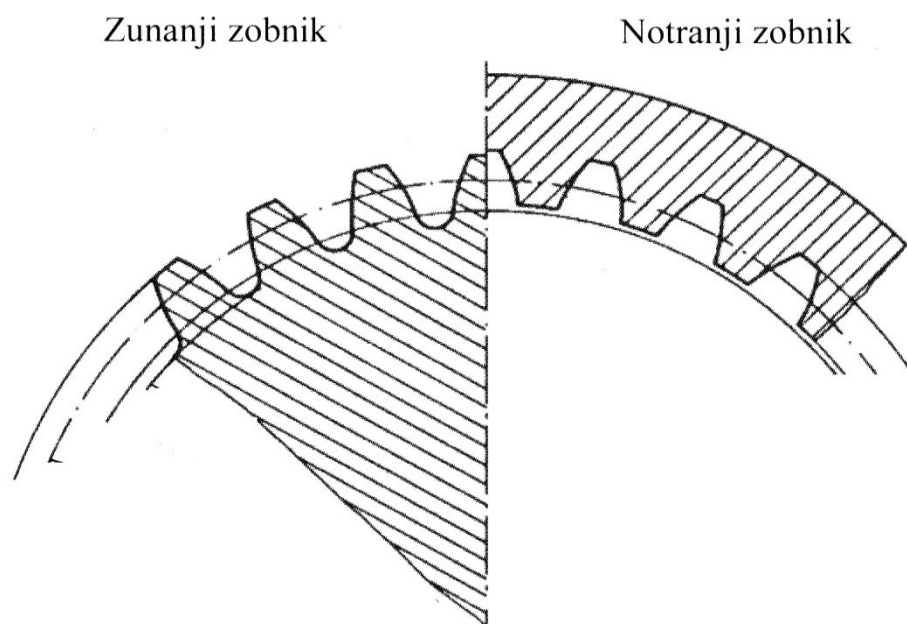
2.1 Oznake in parametri delov ozobja na gredi in notranjih ozobjih kontrolnega kalibra

Pri kontroli debeline zob ne potrebujemo dodatnih orodij, kot so mikrometer ali kljunasto merilo, potrebujemo pa ustrezen kontrolni kaliber z notranjim ozobjem, v katerega bomo vstavljali gredi. Notranje ozobje kalibra mora biti ustrezno konstruirano na podlagi parametrov ozobja na gredi. Oznake delov ozobja na gredi prikazuje slika 2.1



Slika 2.1: Oznake delov zobnika na gredi

Glede na [1] lahko govorimo o notranji valjasti zobniški dvojici, ki je vedno sestavljena iz enega zunanjega in enega notranjega valjastega zobnika. V našem primeru je zobniška gred zunanji zobnik in kontrolni kaliber notranji valjasti zobnik. Kot je razvidno s slike 2.2, imajo zobje notranjega zobnika obliko medzobnih vrzeli zunanjega zobnika, medzobne vrzeli notranjega zobnika pa obliko zob zunanjega zobnika.



Slika 2.2: Notranja valjasta zobniška dvojica

Ker gre pri kontrolnem kalibru prav tako za ravnozobi valjasti zobnik, le da je ozobje na notranji strani, to pomeni, da so deli zobnika enaki glede na sliko 2.1, oznake pa prikazuje tabela 2.1. Z indeksom kal1 so označeni parametri ozobja prvega kalibra.

$h_{(kal1)}$	Višina zoba notranjega zobnika prvega kalibra
$h_{a(kal1)}$	Višina glave zoba notranjega zobnika prvega kalibra
$h_{f(kal1)}$	Višina korena zoba notranjega zobnika prvega kalibra
$p_{n(kal1)}$	Razdelek notranjega zobnika prvega kalibra
$s_{n(kal1)}$	Ločna debelina zoba notranjega zobnika prvega kalibra
$e_{n(kal1)}$	Ločna širina medzobne vrzeli notranjega zobnika prvega kalibra

Tabela 2.1: Oznake delov notranjega zobnika

Parametri za notranji zobnik morajo biti takšni, da se idealno izdelana gred popolnoma prilega v kontrolni kaliber. Tako dobimo tudi referenčne vrednosti idealno izdelane zobniške gredi. Na podlagi teh referenc lahko izvajamo kontrolo z vstavljanjem. Ob slabo izdelanem zobniku na gredi bodo parametri odstopali od referenčne vrednosti, kar pomeni nepravilno prileganje zobniške dvojice in s tem tudi možnost neuspešnega vstavljanja. Kot smo že omenili, glede na [1], so zobniki in zobniške dvojice vedno izdelani z večjimi ali manjšimi napakami (odstopanji). Tako govorimo o dovoljenem odstopanju ali toleranci izdelanega zobnika na gredi od idealne oziroma referenčne vrednosti zobnika. Ločna debelina zob na idealni gredi je v našem primeru 2.00 mm, glede na zahteve izdelave pa je dovoljena toleranca $\pm 25 \mu\text{m}$. Vrednosti parametrov, potrebnih za pravilno konstrukcijo kalibra, morajo upoštevati dovoljene tolerance. Pri pravilni konstrukciji imamo vrednost parametra ločne širine medzobne vrzeli večjo za $+25 \mu\text{m}$ od ločne debeline zoba idealnega zobnika na gredi, kar predstavlja enačba (2.1). Vrednost parametra ločne debeline zoba kalibra pa manjšo za $-25 \mu\text{m}$ od ločne širine medzobne vrzeli idealnega zobnika na gredi, kar predstavlja enačba (2.2).

$$e_{n(kal1)} = s_n + 25 \mu\text{m} \quad (2.1)$$

$$s_{n(kal1)} = e_n - 25 \mu\text{m} \quad (2.2)$$

2.2 Pogoji parametrov zobnikov za popolno prileganje

Za popolno prileganje vsake gredi je treba izpolniti naslednje pogoje parametrov:

1. Ločna debelina zoba gredi mora biti manjša od ločne širine medzobne vrzeli notranjega zobnika, ki je definirana z enačbo (2.3)

$$s_n < e_{n(kal1)} \quad (2.3)$$

2. Ločna širina medzobne vrzeli zobnika gredi mora biti večja od ločne debeline zoba notranjega zobnika, ki je definirana z enačbo (2.4)

$$e_n > s_{n(kal1)} \quad (2.4)$$

Glede na pogoja, opisana z enačbama (2.3) in (2.4), lahko s tako kontrolo v primeru nepravilnega prileganja gredi v kontrolni kaliber ugotovimo, da je ločna debelina zob prevelika ali pa ločna širina medzobne vrzeli premajhna. Tako izločimo predebele gredi v primeru premalo pobranega materiala pri postopku rezkanja. V primeru preveč pobranega materiala pride do problema, ker je ločna širina medzobne vrzeli prevelika oziroma je ločna debelina zoba premajhna. V takih primerih tovrstna kontrola ne ustreza, saj se bo gred še vedno prilegala, kontrola pa ne bo zaznala pretanke gredi. Zato potrebujemo še dodaten kontrolni kaliber, ki je konstruiran tako, da ima vrednost parametra ločne širine medzobne vrzeli manjšo za $-25 \mu\text{m}$ od ločne debeline idealnega zobnika na gredi, kar prikazujeta enačbi (2.5) in (2.6).

$$e_{n(kal2)} = s_n - 25 \mu m \quad (2.5)$$

$$s_{n(kal2)} = e_n + 25 \mu m \quad (2.6)$$

Kontrola pretankih gredi tako deluje na osnovi drugega notranjega zobnika, kamor je možno uspešno vstaviti le pretanke gredi. Z indeksom kal2 so v spodnji tabeli 2.2 označeni parametri ozobja drugega kalibra.

$h_{(kal2)}$	Višina zoba notranjega zobnika drugega kalibra
$h_{a(kal2)}$	Višina glave zoba notranjega zobnika drugega kalibra
$h_{f(kal2)}$	Višina korena zoba notranjega zobnika drugega kalibra
$p_{n(kal2)}$	Razdelek notranjega zobnika drugega kalibra
$s_{n(kal2)}$	Ločna debelina zoba notranjega zobnika drugega kalibra
$e_{n(kal2)}$	Ločna širina medzobne vrzeli notranjega zobnika drugega kalibra

Tabela 2.2: Oznake delov drugega notranjega zobnika

Za popolno prileganje vsake gredi v drugi kontrolni kaliber je treba izpolniti naslednje pogoje parametrov:

1. Ločna debelina zoba gredi mora biti manjša od ločne širine medzobne vrzeli drugega notranjega zobnika, ki je definirana z enačbo (2.7).

$$s_n < e_{n(kal2)} \quad (2.7)$$

2. Ločna širina medzobne vrzeli zobnika gredi mora biti večja od ločne debeline zoba drugega notranjega zobnika, ki je definirana z enačbo (2.8)

$$e_n > s_{n(kal2)} \quad (2.8)$$

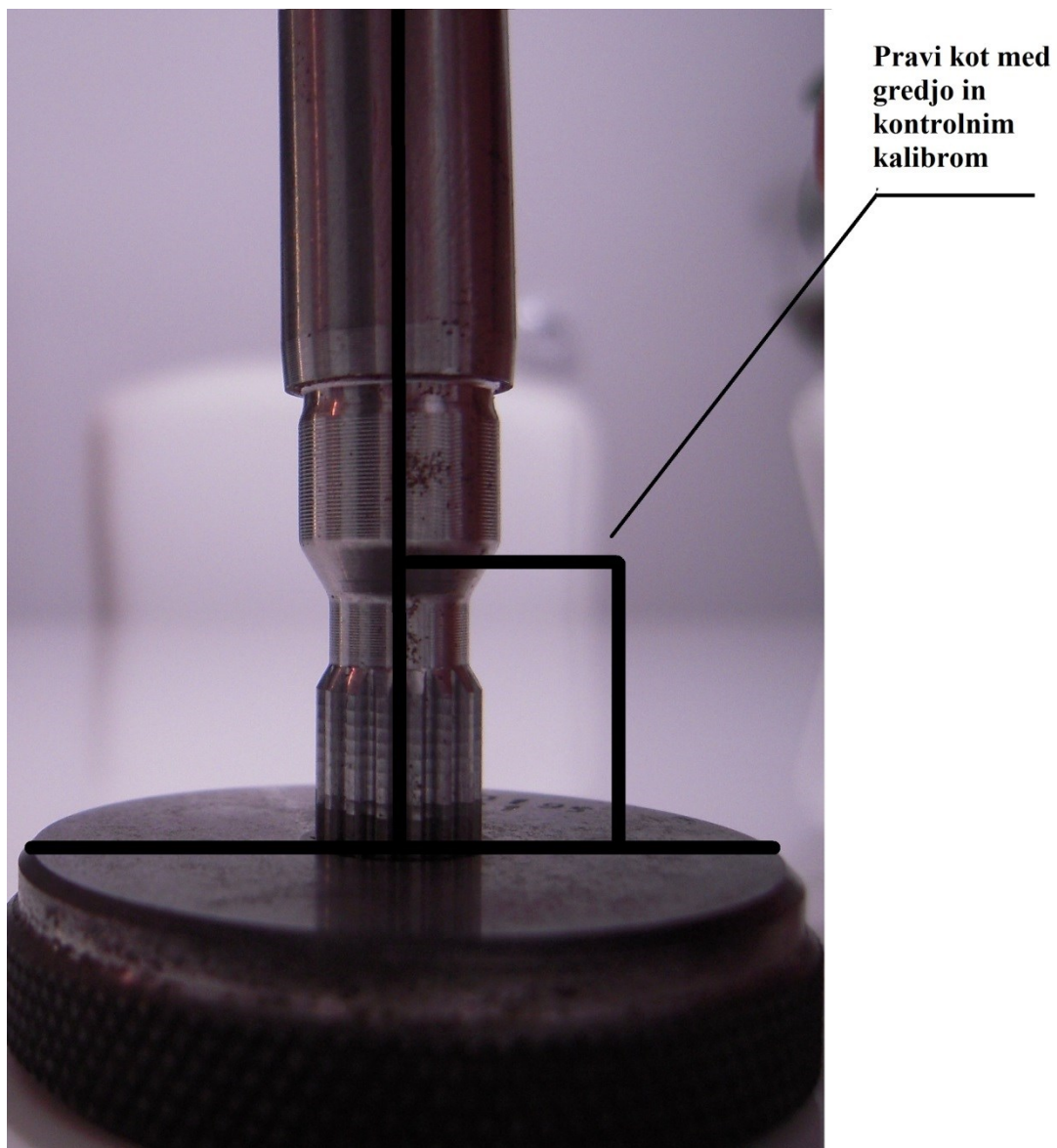
V primeru izpolnjenih pogojev, definiranih z enačbama (2.7) in (2.8), je prileganje gredi v drugi kontrolni kaliber uspešno, kar pomeni, da je taka gred pretanka in se lahko izloči.

2.3 Postopek ročnega vstavljanja gredi v kontrolni kaliber

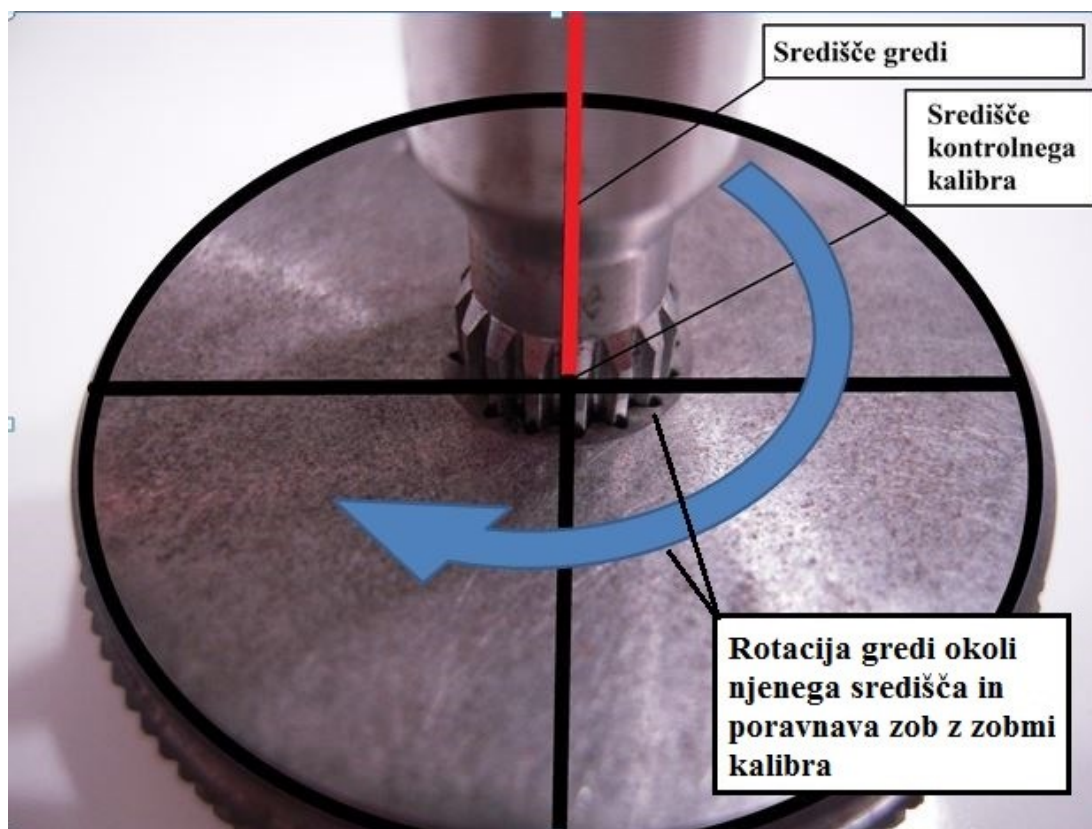
Pokazali smo, da ob pravilno izdelani gredi lahko s prileganjem gredi v kontrolni kaliber preverjamo debelino zob na zobniški gredi. Vendar moramo za ugotavljanje prileganja zobniške dvojice izpolniti še dodatne pogoje pri vstavljanju gredi. Pri tem moramo vzdrževati določena geometrijska razmerja, da lahko uspešno vstavimo vsako gred v kontrolna kalibra. Problematika vstavljanja je natančno razložena v podpoglavju 3.3 kot osnovni problem robotskega vstavljanja čepa v luknjo.

Pri vrsti kontrole z vstavljanjem gredi je treba izpolniti naslednje pogoje:

1. Vstavitev gredi popolnoma pravokotno glede na kontrolni kaliber. Prikazano na sliki 2.3.
2. Poravnava središča gredi natančno s središčem kontrolnega kalibra. Prikazano na sliki 2.4.
3. Poravnava zob gredi z zobmi kontrolnega kalibra. Prikazano na sliki 2.4



Slika 2.3: Stranska slika pravokotne poravnave gredi na kontrolni kaliber



Slika 2.4: Poravnava središč zobnikov in poravnava zob z zobmi kalibra

Glede na pogoje, predstavljene na slikah 2.3 in 2.4, lahko postopek ročnega vstavljanja razdelimo na štiri korake. Prvi korak je približevanje gredi pravokotno glede na kontrolni kaliber, dokler ne vzpostavimo kontakta. Ob kontaktu središče gredi poravnamo s središčem kalibra. Pri tretjem koraku ob ohranjanju pravokotnosti in poravnave središč rotiramo gred okoli njenega središča, dokler ne dosežemo poravnave zob. Ob pravilni izvedbi vseh prejšnjih korakov se mora gred ob manjšem delovanju vertikalne sile pravilno usesti v notranji zobnik.

Poleg omenjenih pogojev je treba vedeti, ali je zobniška gred izdelana iz nekaljenega jekla, ki ima natezno trdnost 800 N. Sila tako ne sme presegati omenjene vrednosti, kar pa je pri ročnem vstavljanju skoraj nemogoče doseči. Prav tako je treba kontrolo zobnika na gredi izvajati čez celotno površino, kar pomeni, da moramo vstaviti celotni zobnik v kaliber.

3 Teorija robotskega vstavljanja

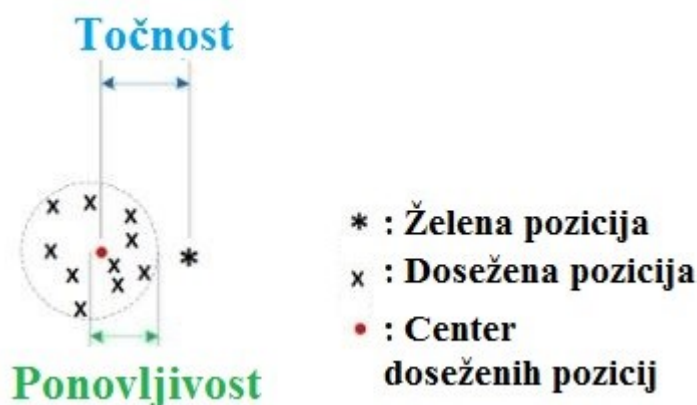
3.1 Razlaga

Avtomatizacija opisane kontrole bi tako obsegala zamenjavo ročnega vstavljanja gredi, kjer to delo opravlja človek z industrijskim robotom. Kot že omenjeno, je vstavljanje gredi pri robotu opisano kot montažni proces. Za učinkovito realizacijo tega procesa moramo najprej razumeti osnovne lastnosti industrijskih robotov.

3.2 Osnovne lastnosti industrijskih robotov

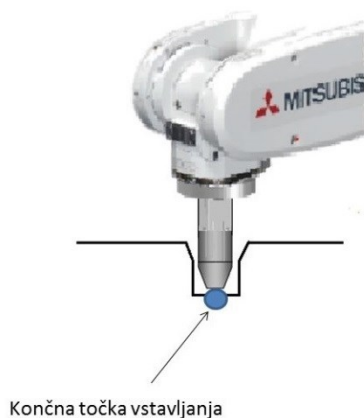
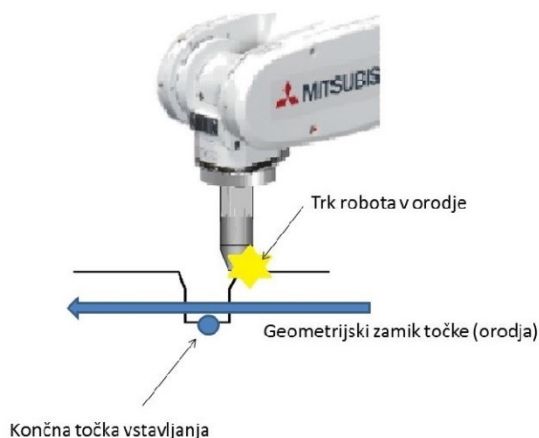
Industrijski roboti delujejo na osnovi vnaprej določenih programiranih premikov in trajektorij gibanja. S programerskega stališča to zahteva učenje in shranjevanje pozicij oziroma točk robota v kartezičnem koordinatnem sistemu, po katerih se robot pomika.

Glavni lastnosti natančnosti pomikanja robota v omenjene točke imenujemo točnost in ponovljivost robota in ju ne smemo zamenjevati. Točnost je razlika med položajem, ki ga vrh robota doseže, in položajem, ki je bil programiran. Ponovljivost pa je največja razlika med doseženimi točkami, ki nastane pri vodenju robota iz poljubnih točk v isto končno točko (glej sliko 3.1). [2]



Slika 3.1: Prikaz geometrijskega pomena točnosti in ponovljivosti industrijskega robota

V omenjenih odlikah industrijskih robotov smo omenili tudi napredek v točnosti in ponovljivosti. Za potrditev naše trditve bomo glede na [3] vzeli za primerjavo standardno ponudbo industrijskih robotov proizvajalca Mitsubishi electric. Opazimo lahko, da po specifikacijah večina robotov dosega ponovljivost v območju $\pm 20 \mu\text{m}$. Glede na to lahko ugotovimo, da so sodobni roboti sposobni opravljati določene operacije sestavljanja s tolerancami le nekaj mikrometrov. Vendar pri tako zelo preciznem vstavljanju vsak najmanjši geometrijski zamik luknje, slabo prijetje kosa z robotskim prijemalom ali sam zamik prijemala lahko pomeni neuspešno vstavljanje. Mogoče pa je, da montažni proces zahteva večjo preciznost vstavljanja, kot jo zmorejo trenutni roboti. Take situacije lahko privedejo do togega trka robota v orodje zaradi njegove togosti, saj pri robotih v osnovi nimamo kontrole nad tem, s kakšno silo naj vrh deluje na okolje (glej sliko 3.2). Tako pridemo do osnovnega problema robotske montaže, ki je opisan kot problem vstavljanja čepa v luknjo.

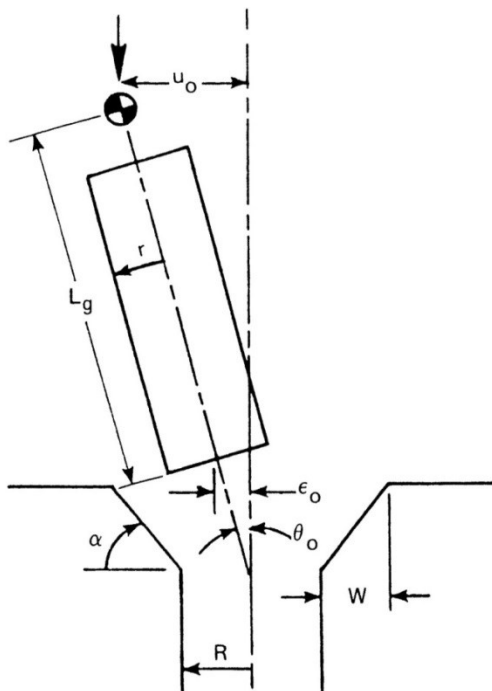
Vstavljanje uspešno:**Vstavljanje neuspešno:**

Slika 3.2: Primera uspešnega in neuspešnega vstavljanja

3.3 Problem vstavljanja čepa v luknjo**3.3.1 Definicija**

Vstavljanje čepa v luknjo je glede na [4] geometrijski problem in je razložen z osnovnim dvodimenzionalnim primerom, ki ga prikazuje slika 3.3. Glede na primer lahko napako pričakujemo zaradi geometrijskega zamika čepa. Zamik je definiran kot razdalja U_0 od centra voljnosti čepa in ene strani središča osi luknje. Tako je razdalja U_0 vsota napake začetnega bočnega ϵ_0 in kotnega zamika θ_0 osi čepa od središča osi luknje, kar opisuje enačba (3.1). Pri enačbi moramo upoštevati še razdaljo L_g med centrom voljnosti in spodnjim delom čepa.

$$U_0 = \epsilon_0 + L_g \theta_0 \quad (3.1)$$

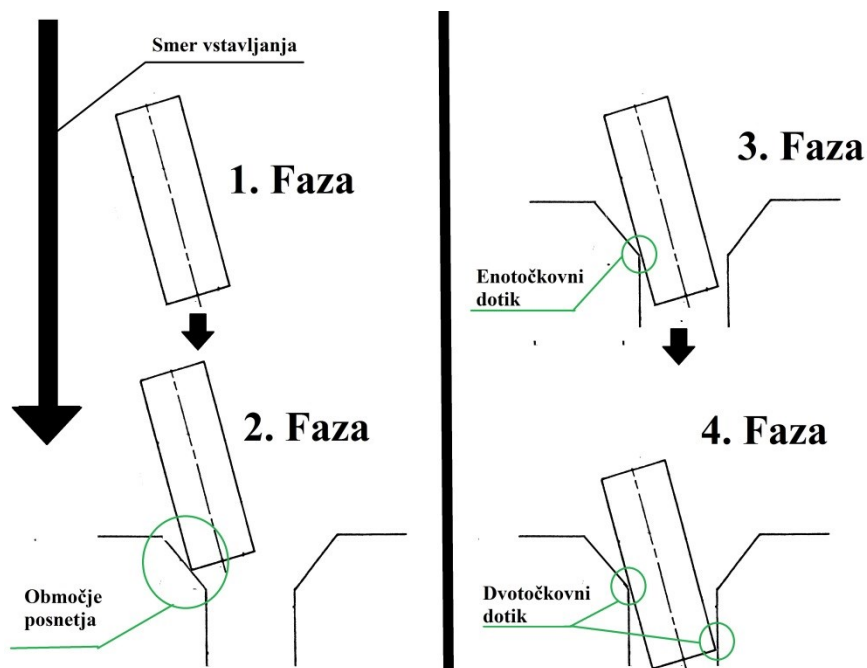


Slika 3.3: Primer vstavljanja čepa v luknjo

Poleg geometrijskih zamikov slika 3.3 prikazuje fazo približevanja in območje posnetja luknje, kjer je naklon posnetja označen s črko α , širina pa s črko w . Z polmerom luknje R in polmerom čepa r lahko definiramo še zračnost med luknjo in čepom (3.2).

$$C = \frac{R-r}{R} \quad (3.2)$$

Postopek vstavljanja čepa lahko razdelimo na štiri faze, kot to prikazuje slika 3.4.



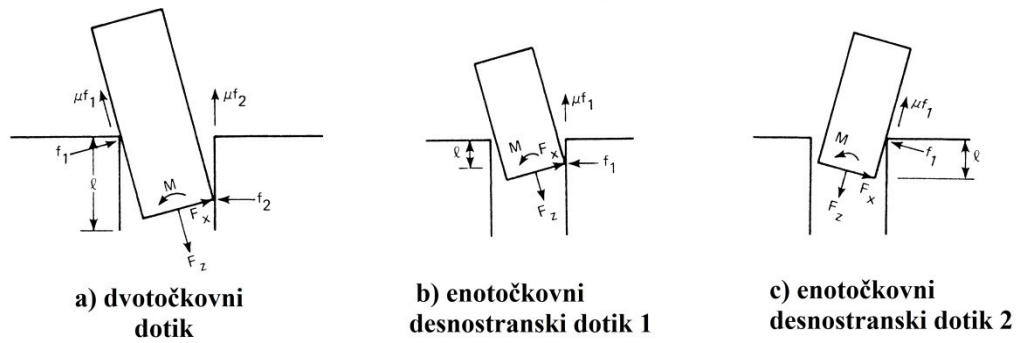
Slika 3.4: Faze vstavljanja čepa v luknjo

Prva faza je približevanje čepa luknji. Druga faza je začetni kontakt čepa z luknjo oziroma prehod območja posnetja luknje. Ta faza je glede na sliko 3.3 uspešna v primeru, ko je absolutni začetni bočni zamik manjši od območja posnetja (3.3). Po drugi fazi, ko se konica čepa dotakne konca območja posnetja, sledi faza enotočkovnega dotika in po tej fazi še dvotočkovni dotik. V nekaterih primerih je možno, da se dvotočkovni dotik ne zgodi, ampak se lahko ponovi enotočkovni dotik.

$$|\epsilon_0| < w \quad (3.3)$$

3.3.2 Sile in momenti med vstavljanjem čepa v luknjo

Zaradi začetnega geometrijskega zamika lahko pri kontaktu z luknjo med fazami vstavljanja pričakujemo premik čepa, ki je posledica sil in momentov (F_x, F_z, M) , kar prikazuje slika 3.5. Na sliki so z oznakami (f_1, f_2) označene reakcijske sile pri kontaktu čepa z luknjo.



Slika 3.5: Prikaz sil in momentov pri enotočkovnem in dvotočkovnem dotiku

Za uspešno vstavljanje moramo zato vzdrževati določena razmerja sil in momentov med fazo dvotočkovnega dotika, kar zagotavlja izognitev pojavi zatikanja (ang. *jamming*). Do zatikanja pride, kadar sile, delujoče na čep, kažejo v napačne smeri. Do podobnega pojava, imenovanega zagozditev (ang. *wedging*), lahko pride v primeru prehitrega pojava dvotočkovnega dotika. Zagozditev je pojav, ko je čep videti zagozden, vendar je drugače kot pri zatikanju problem geometrijski, in ne napačno usmerjene sile ter se lahko zgodi če ni izpolnjen pogoj (3.4). Zagozditve so lahko tako močne, da tudi s spremembo smeri in moči sil ne moremo nadaljevati vstavljanja, ne da bi poškodovali čep v točkah dotika.

$$\theta_2 < \frac{c}{\mu} \quad (3.4)$$

Z opazovanjem drsenja čepa v luknjo lahko definiramo parameter λ , ki predstavlja globino čepa v luknji in je razmerje med globino l in dvakratnim produktom trenja μ ter polmera čepa r (3.5).

$$\lambda = \frac{l}{2r\mu} \quad (3.5)$$

Pri tretji fazi vstavljanja lahko pričakujemo štiri različne možne enotočkovne dotike. Dva desnostranska sta prikazana na sliki 3.5.

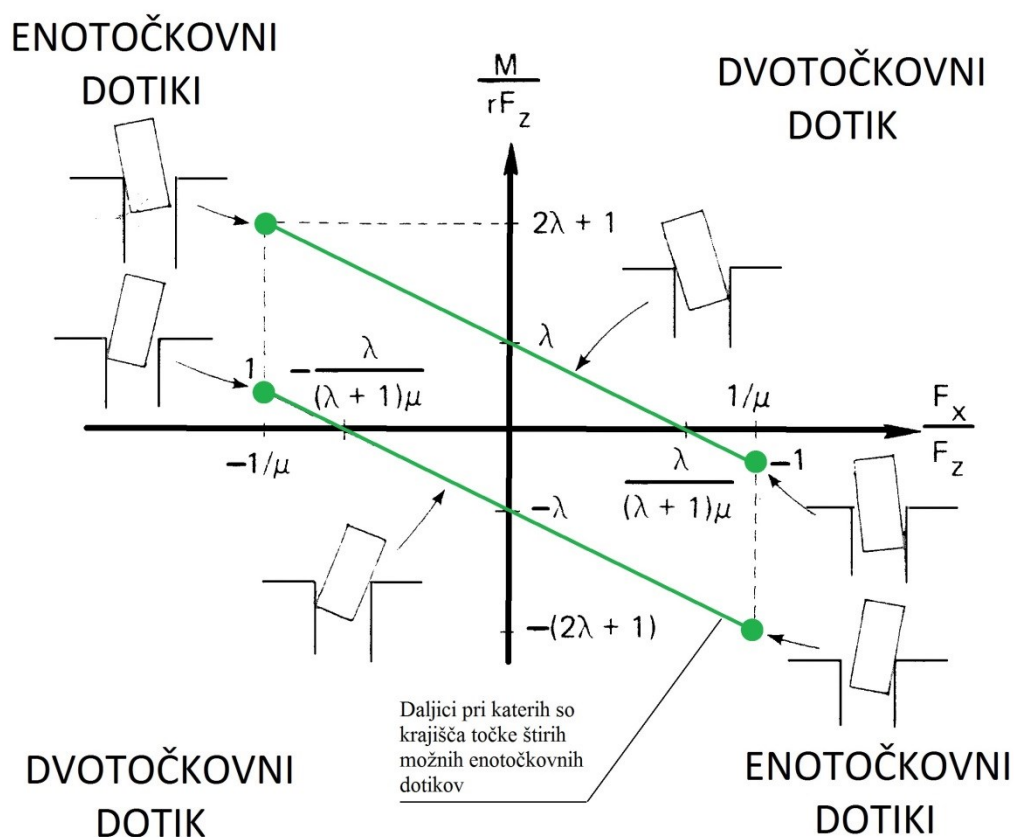
Razmerje sil, potrebnih za uspešno vstavljanje, lahko prikažemo na sliki 3.6 z diagramom zataknitve. Na diagramu, kjer je abscisna os definirana z razmerjem $\frac{F_x}{F_z}$, ordinatna pa z $\frac{M}{rF_z}$, imamo dve daljici, pri katerih so krajišča točke štirih možnih enotočkovnih dotikov. Če krajišča povežemo z vertikalnimi prekinjenimi črtami, dobimo obliko paralelograma. S kombinacijami sil in momentov (F_x, F_z, M) , znotraj dobljenega paralelograma, dosežemo uspešno vstavljanje. Kombinacije sil zunaj paralelograma pa povzročijo zataknitve, kar pomeni neuspešno vstavitve čepa v luknjo. Ugotovitev lahko tudi zapišemo v obliki enačbe (3.6).

$$\frac{M}{rF_z} = \pm \lambda - \frac{F_x}{F_z}(1 + \lambda) \quad (3.6)$$

Tako lahko glede na enačbo (3.6) določimo pogoj za izognitev zataknitve določen z neenačbama (3.7) in (3.8).

$$\left| \frac{M}{rF_z} + \frac{F_x}{F_z}(1 + \lambda)\mu \right| < \lambda \quad (3.7)$$

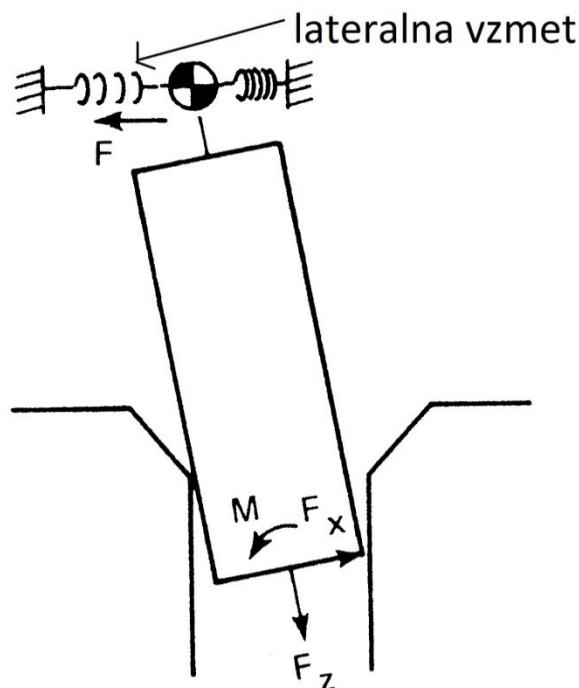
$$\frac{F_x}{F_z} < \frac{1}{\mu} \quad (3.8)$$



Slika 3.6: Diagram zataknitve in dobljeni paralelogram

3.4 Rešitve vstavljanja čepa v luknjo

V podpoglavju 3.2 smo glede na [4] z analizo osnovne problematike vstavljanja čepa v luknjo dokazali, da moramo za uspešno opravilo vzdrževati določena geometrijska razmerja za posredno vzdrževanje razmer sil in momentov. To pomeni, da mora imeti čep oziroma manipulator, ki opravlja vstavljanje, določeno mehansko voljnost (ang. *compliance*). Najosnovnejši sistem voljnosti lahko razložimo na primeru, prikazanem na sliki 3.7.



Slika 3.7: Čep, pritrjen na podporo, sestavljeno iz lateralne vzmeti

V gornjem primeru je čep pritrjen na podporo, ki je sestavljena iz lateralne vzmeti. Točko vpetja imenujemo center voljnosti; spreminja se glede na razmerja sil in navorov. Čep ima v centru voljnosti zaradi prečne vzmeti možnost lateralnega pomika in s tem tudi možnost prilagajanja luknji. Z nadgradnjo takega primera pridemo do mehanskih naprav, imenovanih RCC (ang. *remote center compliance*), ki so sposobne opravljati premike središč voljnosti v šestih prostostnih stopnjah. Takim metodam, ki uporabljajo mehanske naprave, pravimo pasivni načini zagotavljanja mehanske voljnosti. Poleg njih imamo na voljo tudi aktivne rešitve, ki delujejo na podlagi programskega reguliranja lege vrha robota. V nadaljevanju sta predstavljeni dve najbolj razširjeni rešitvi.



Slika 3.8: RCC naprave

3.4.1 Programirana aktivna voljnost brez uporabe senzorja sile (ang. *compliance control*)

Vodenje robota običajno izvajamo v zunanjih koordinatah, torej v prostoru naloge. To pomeni, da nas neposredno zanima predvsem lega vrha robota, le redkokdaj pa tudi položaji v sklepih. Pri tem je treba upoštevati, da neposredno reguliramo vedno le položaje v sklepih, samo posredno pa lego vrha robota, ki je določena s kinematičnim modelom robotskega mehanizma ob danih vrednostih položajev v sklepih [2]. Pri programirani aktivni voljnosti glede na [2] lahko uporabimo več vrst regulacij ali vodenj v zunanjih koordinatah:

- Regulacija na osnovi transponirane Jacobijeve matrike
- Regulacija na osnovi inverzne Jacobijeve matrike
- PD regulacija položaja s kompenzacijo gravitacije v zunanjih koordinatah
- Vodenje robotov na osnovi inverzne dinamike v zunanjih koordinatah.

Pri vseh vrstah vodenja moramo upoštevati pomembno zvezo med navori v sklepih in silo na vrhu robotskega manipulatorja, definirano z enačbo (3.9). V enačbi je oznaka T vektor navorov vseh sklepov. V transponirani Jacobijevi matriki robota $J^T(q)f$ je f vektor vseh sil na vrhu robotske roke.

$$\tau = J^T(q)f \quad (3.9)$$

Glede na [5] lahko z upoštevanjem zunanje sile zapišemo kinematični model manipulatorja z n členi v obliki enačbe (3.10).

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + B(q, \dot{q}) + G(q) + \tau_e = \tau \quad (3.10)$$

kjer je

τ vektor navorov v sklepih

q vektor pozicij sklepov

M simetrično pozitivno definirana matrika vztrajnosti manipulatorja

C vektor Coriolisovih in centrifugalnih navorov

B vektor navorov delujočih na sklepe manipulatorja

G vektor gravitacijskih navorov

τ_e vektor sil in navorov povzročenih na okolje zaradi vrha robota

Z uporabo PD regulacije lahko tak pristop vodenja manipulatorja zapišemo v obliki enačbe (3.11).

$$\tau = \hat{M}(q)\ddot{q}_d + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q}_d + \hat{B}(q, \dot{q}) + \hat{G}(q) + K_p e_q + K_v \dot{e}_q \quad (3.11)$$

Pri uporabi pozicijskih in hitrostnih napak ($e_p, \dot{e}_p$) lahko enačbi (3.10) in (3.11) medsebojno primerjamo in dobimo enačbo (3.12), kjer je $\Delta\tau$ vektor napak sil in navorov.

$$\tau_e = K_p e_q + K_v \dot{e}_q + \Delta\tau \quad (3.12)$$

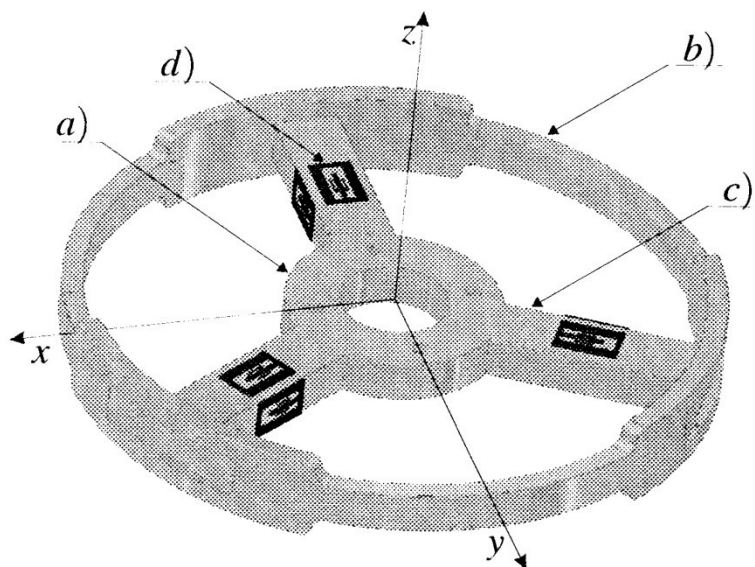
Iz enačbe (3.12) je razvidno, da lahko s pozicijskimi in hitrostnimi napakami uravnotežimo sile in navore na vrhu robota. Z zmanjševanjem ojačitev kontrolnih pozicijskih zank se pozicijske napake lahko povečajo, kar pomeni prilagajanje robota

okolju. Vrh robota bo izkazoval osnovne lastnosti vzmeti in tako deloval na enak način kot mehanske RCC naprave, opisane na začetku poglavja.

3.4.2 Programirana aktivna voljnost z uporabo senzorja sile

Z uporabo naštetih pristopov vodenja lahko reguliramo silo dotika na vrhu robotske roke le z uporabo vgrajenih servomotorjev in ne potrebujemo dodatnih naprav. Vendar taka rešitev ni vedno ustrezna zaradi premajhne občutljivosti kontaktnih sil pri vstavljanju, saj informacije sil in navorov dobivamo posredno le preko servomotorjev robota. Tudi večina industrijskih robotov serijsko ne omogoča merjenja sil in navorov, delujočih na vrh robotske roke. Za natančnejše informacije o silah običajno potrebujemo dodatne naprave, ki se tako kot pasivne rešitve pritrdijo v zapestje robota in jih imenujemo senzorji sile (ang. *force sensor*).

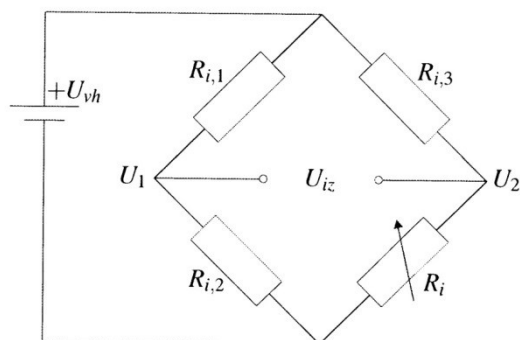
V omenjenih senzorjih, merjenje sile običajno temelji na uporabi uporovnih lističev. Uporovni listič je pritrjen na elastični prečnik, ki se pod vplivom sile deformira. Deformacija prečnika razultira v spremembi upornosti nanj pritrjenega uporovnega lističa. Uporovni listič se torej obnaša kot spremenljiv upor, katerega upornost se spreminja kot funkcija deformacije. Seveda zahtevamo, da senzor sile ne vpliva na interakcijo med robotom in okolico, kar z drugimi besedami pomeni, da mora biti dovolj tog. Robotski senzorji so običajno zgrajeni, kot prikazuje slika 3.9. Osnovna zgradba senzorja temelji na treh komponentah: a) togo telo, ki je v stiku z vrhom robota, b) togo telo, ki je v stiku z okolico robota in c) elastični prečniki, ki med seboj povezujejo obe telesi. Ob dotiku okolja se prečniki zaradi zunanjih sil deformirajo, kar povzroči spremembo upornosti uporovnih lističev.



Slika 3.9: Model senzorja sil in navorov: a) togo telo, ki je v stiku z vrhom robota, b) togo telo, ki je v stiku z okolico robota, c) elastični prečnik in d) uporovni listič

V tridimenzionalnem prostoru je vektor sil in navorov, ki delujejo na vrh robota sestavljen iz šestih komponent, tri za silo in tri za navor. Prečnik oblike kvadra, kot je prikazan na sliki 3.9, omogoča merjenje deformacije v dveh smereh, torej potrebujemo merjenje šestih komponent vektorja sil in navorov vsaj tri nekolinearne prečnike. Vsak prečnik je opremljen z dvema uporovnima lističema, ki sta med seboj postavljena pod pravim kotom. Ker imamo šest uporovnih lističev, imamo torej šest spremenljivih upornosti. Posledica delovanja zunanjih sil in navorov so spremembe upornosti. Majhne spremembe upornosti pretvorimo v napetostne signale z uporabo Wheatstonovega mostiča, kot je prikazan na sliki 3.10. Vsaki od spremenljivih upornosti $\{R_1 \dots R_6\}$ dodamo še tri upore enakih vrednosti, ki jih skupaj z uporovnim lističem vežemo v mostič. Mostič je napajan z napetostjo U_{vh} , njegova izhodna napetost U_{iz} pa je določena z razliko $U_1 - U_2$. Napetost U_1 je enaka.

$$U_1 = \frac{R_{i,2}}{R_{i,2} + R_{i,1}} U_{vh}, \quad (3.13)$$



Slika 3.10: Wheatstonov mostič

napetost U_2 pa

$$U_2 = \frac{R_i}{R_i + R_{i,3}} U_{vh}. \quad (3.14)$$

Izhodna napetost je torej

$$U_{iz} = \left(\frac{R_{i,2}}{R_{i,1} + R_{i,2}} - \frac{R_i}{R_i + R_{i,3}} \right) U_{vh}. \quad (3.15)$$

Z odvajanjem enačbe (3.15) po spremenljivki R_i določimo vpliv spremembe upornosti uporovnega lističa na izhodno napetost.

$$\Delta U_{iz} = - \frac{R_{i,3} U_{vh}}{(R_i + R_{i,3})^2} \Delta R_i \quad (3.16)$$

Pred uporabo senzorja sile je potrebno izvesti kalibracijo, na podlagi katere se določi kalibracijska matrika potrebna za transformacijo izhodnih napetostnih signalov v podatke merjenih sil in navorov [2, stran 60-62].

Poleg senzorja sile potrebujemo še:

- logično programirljiv krmilnik (ang. *logical programmable controller*), v katerem moramo zapisati program za pravilno izračunavanje transformacije.
- komunikacijsko opremo za pošiljanje informacij o silah in navorih iz senzorja v robotski krmilnik.
- regulacijo za pretvarjanje informacij o silah in momentih v ustrezne pozicijske premike sklepov v robotski roki.

4 Opis programske in strojne opreme

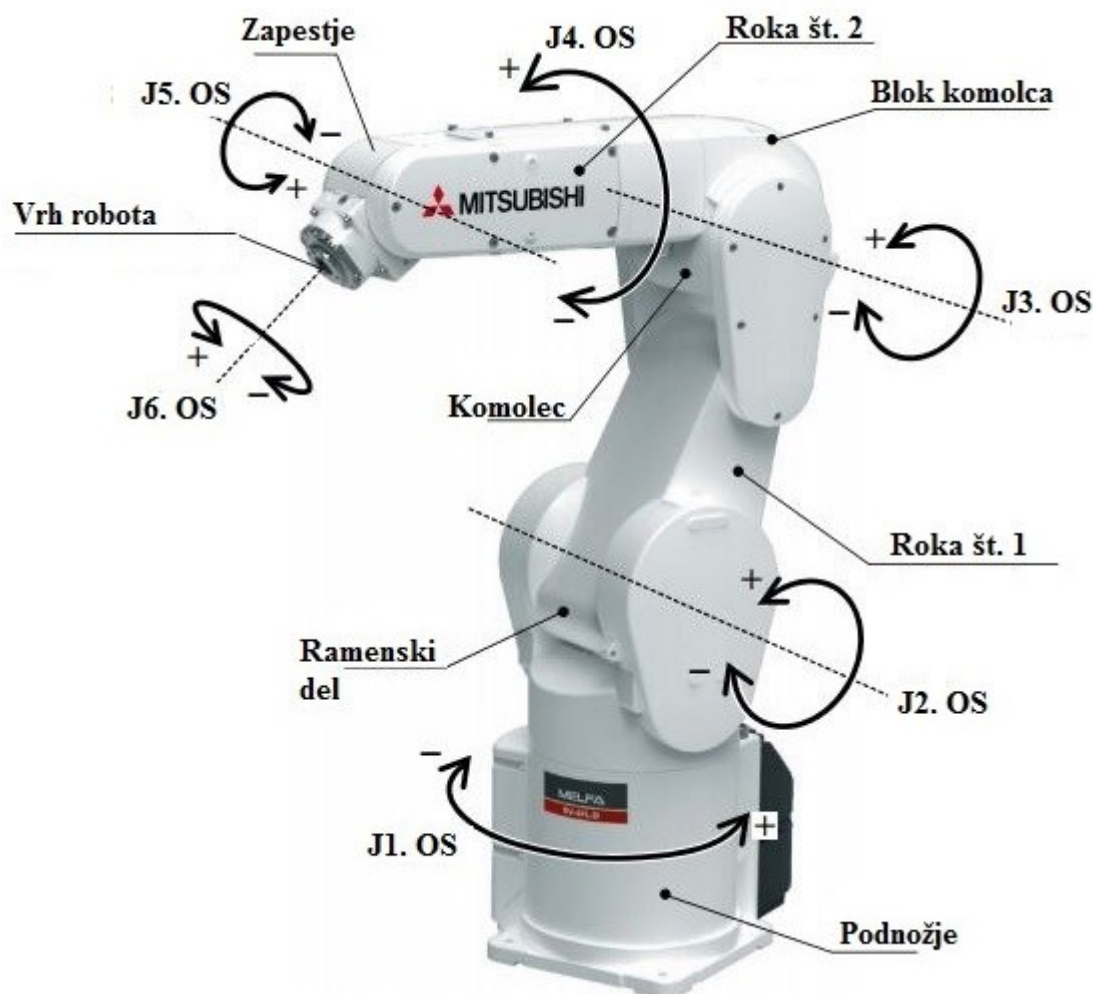
Zasnova in testiranje aplikacije sta bila v celoti opravljena na podlagi opreme za avtomatizacijo japonskega proizvajalca Mitsubishi electric.

4.1 Industrijski robot RV - 4FLMQ

Robot RV- 4FLMQ je model iz najnovejše serije 6-osnih robotov japonskega proizvajalca, imenovane serija F, ki jo odlikujejo hitrost, točnost, kompaktna oblika in dolga življenjska doba. Robotski sistem tvorita robotska roka RV-4FLM in krmilnik CR-750-Q.

4.1.1 Robotska roka

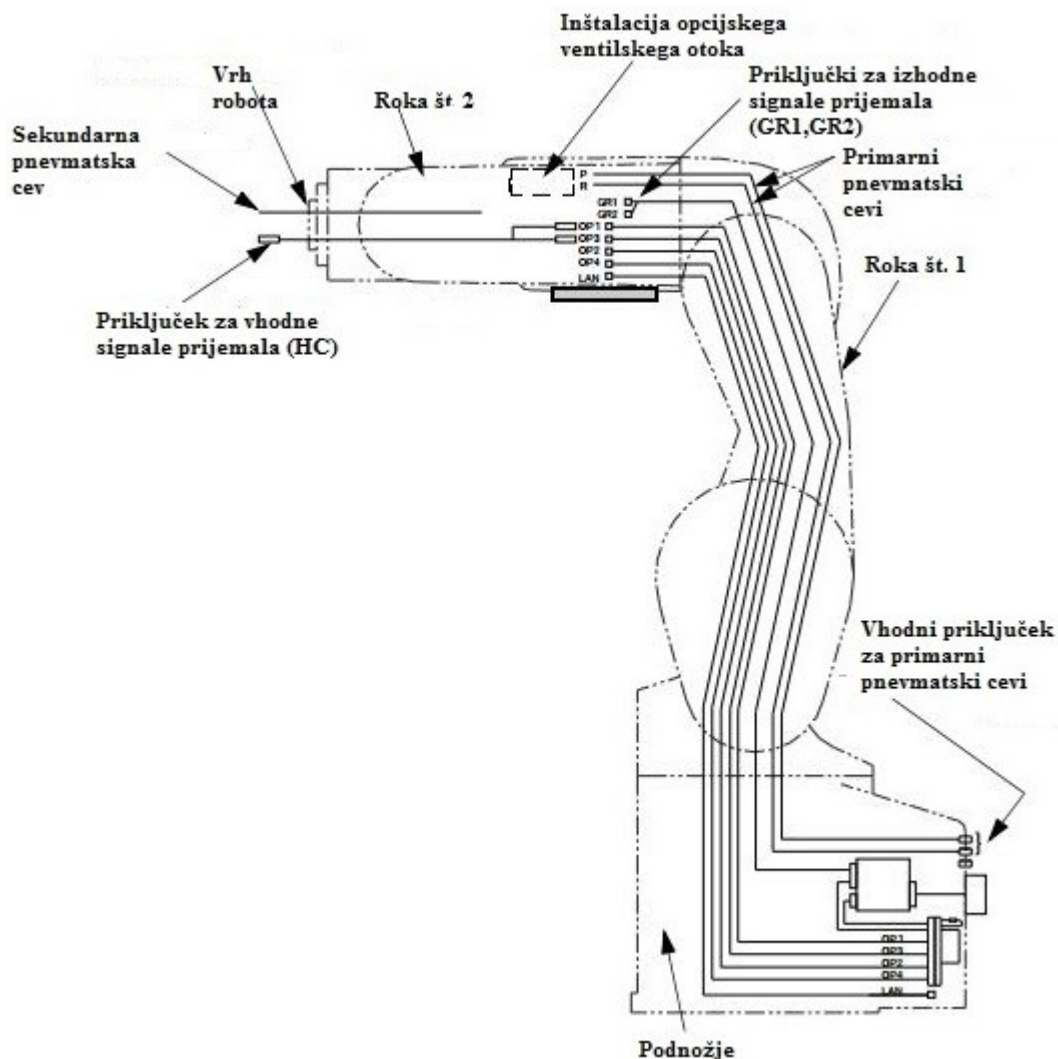
Pri robotski roki gre za antropomorfno roko s šestimi rotacijskimi sklepi. Vsak sklep vsebuje AC servomotor in absolutni kodirnik, ki shranjuje trenutni položaj motorja. Strukturo roke prikazuje slika 4.1 [6].



Slika 4.1: Struktura robotske roke

Tip robotske roke je bil glede na zahteve vstavljanja gredi v kontrolni kaliber izbran na podlagi parametrov nosilnosti (4 kg), delovnega prostora (649 mm), časa cikla (0.36 s) in ponovljivosti robotske roke, ki je ± 0.02 mm.

Robotska roka ima serijsko vgrajene cevi za pnevmatiko, kable in priključke za vhodno-izhodne signale, ki so potrebni za upravljanje elektromehanskih ali pnevmatskih prijemal, kar prikazuje slika 4.2. S tem se med daljšim obratovanjem robota izognemo fizičnim poškodbam napeljave robotskega prijemala [6].



Slika 4.2: Notranja napeljava robotske roke

4.1.2 Krmilnik CR-750-Q

Glede na krmilnik imamo pri japonskem proizvajalcu dve možni konfiguraciji, imenovani serija D ali serija Q robotskih krmilnikov. Prva je namenjena manjšim robotskim celicam, pri katerih upravljamo s celotno robotsko celico preko robotskega krmilnika. Serija Q pa je namenjena večjim robotskim celicam, pri katerih je robot

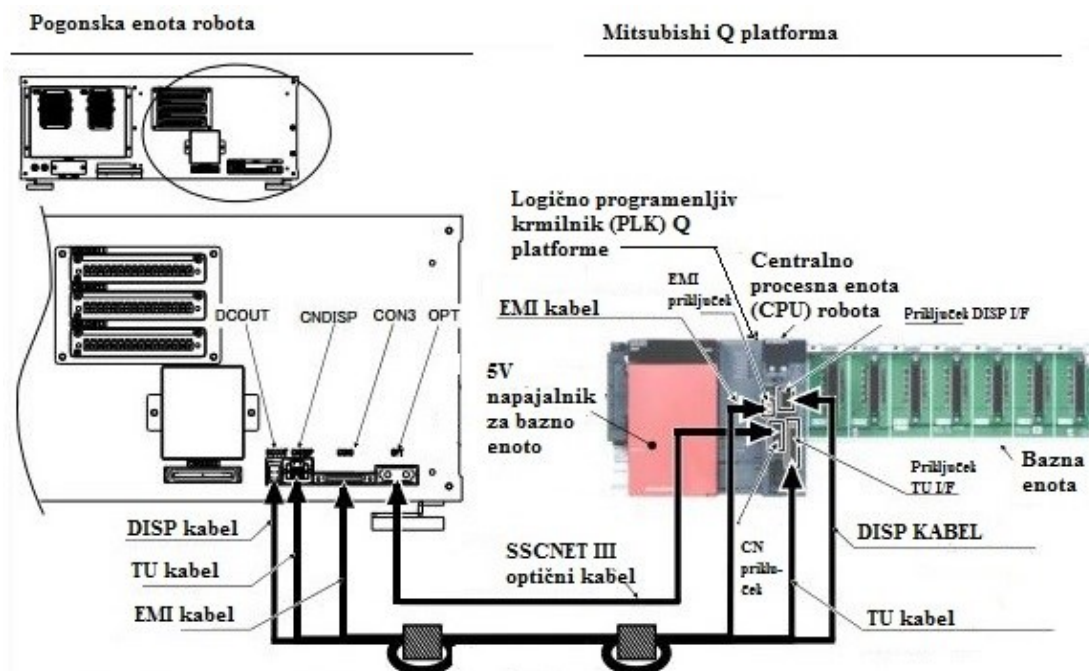
sistemske vgrajen kot del večjega sistema krmiljenega z zmogljivo Mitsubishijevo platformo Q.

CR-750-Q krmilnik sestavljajo pogonska enota robota (ang. *drive unit*), centralna procesna enota (ang. *CPU*), ki se vgradi na bazo platforme Q in baterija CPU enote. Baterija skrbi za shranjevanje programov in kalibracije robota tudi v primeru izpada napajanja z električno energijo [7].



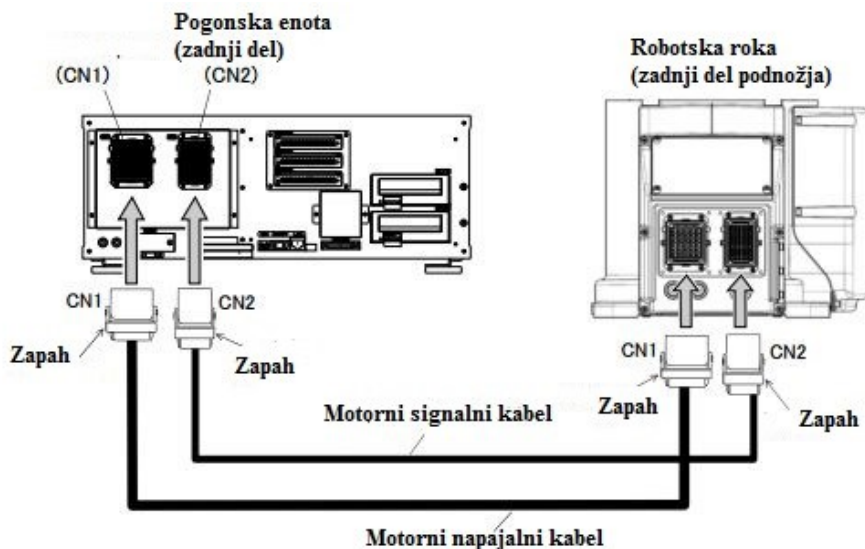
Slika 4.3: Prikaz pogonske enote, centralno procesne enote in baterije v sklopu krmilnika CR-750-Q

Pogonska enota in centralna procesna enota sta povezani preko serije komunikacijskih kablov, kar prikazuje slika 4.4 [7].



Slika 4.4: Električna povezava robotskega krmilnika CR-750-Q

Robotska roka in krmilnik sta v osnovi povezana preko dveh glavnih kablov. Prvi je motorni napajalni kabel, ki zagotavlja napajanje od krmilnika do motorjev robotske roke (CN1). Drugi kabel je t.i. motorni signalni kabel (CN2), preko katerega si robotska roka in krmilnik izmenjujeta signale za servomotorje[8].



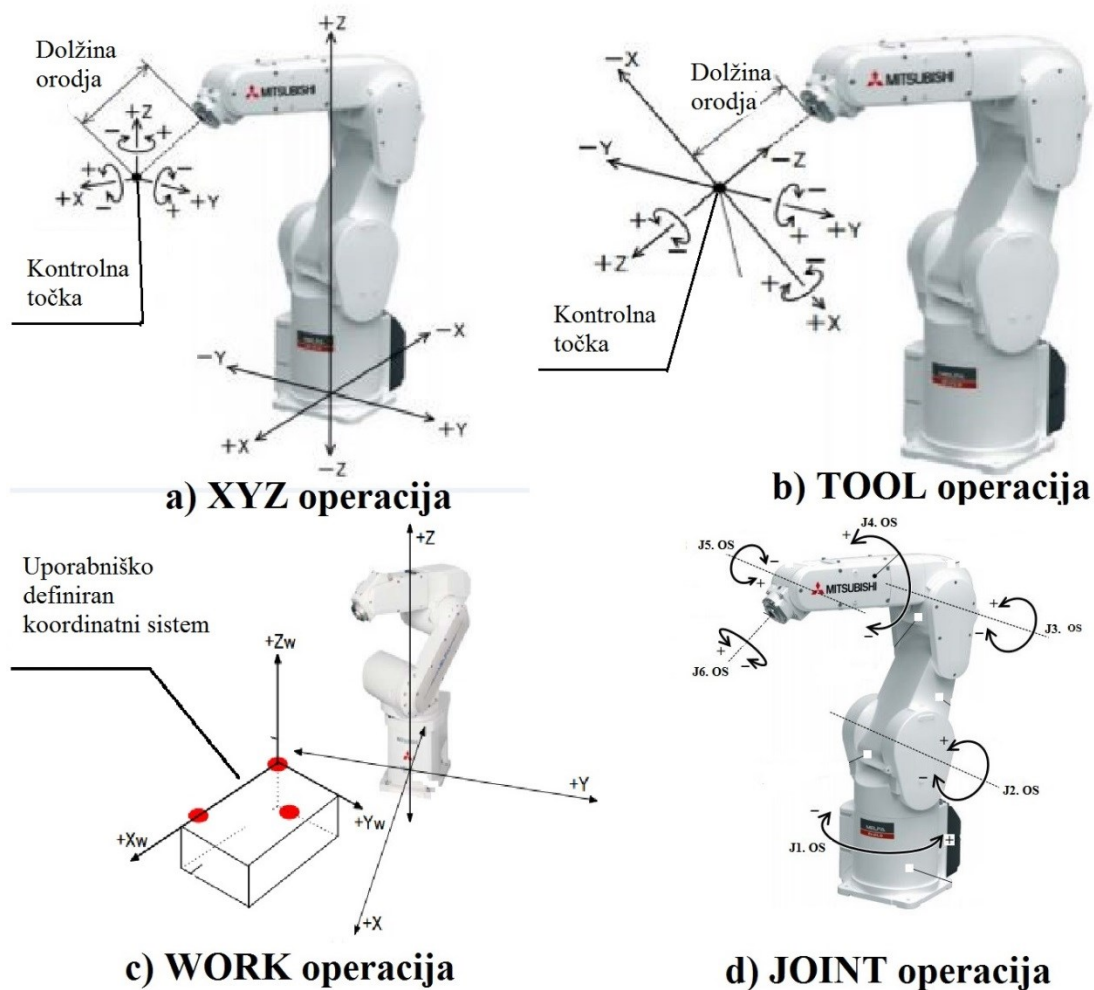
Slika 4.5: Električna povezava robotskega krmilnika in robotske roke

4.1.3 Koordinatni sistemi

V robotiki imamo za premikanje robotske roke v prostoru na voljo več vrst koordinatnih sistemov, kot so bazni koordinatni sistem, koordinatni sistem orodja in uporabniško definirani koordinatni sistem. Pri robotu RV-4FLMQ imamo glede na našete koordinatne sisteme naslednje operacije premikanja robotske roke:

- operacija XYZ (ang. *XYZ operation*) je premikanje vrha robota po baznem koordinatnem sistemu, kjer je po navadi koordinatno izhodišče baznega sistema točno na sredini podstavka robotske roke. Ta način se tudi največkrat uporablja. Bazni koordinatni sistem se po potrebi lahko tudi poljubno programsko spreminja oziroma zamika.
- operacija orodja (ang. *Tool operation*) podobno kot operacija XYZ omogoča premikanje po koordinatnem sistemu, vendar je v tem primeru koordinatno izhodišče sistema definirano točno na vrhu robotske roke.
- WORK operacija (ang. *WORK operation*) omogoča premikanje robota po uporabniško definiranim koordinatnim sistemom, ki se ga poljubno določi v parametrih robotskega krmilnika.

V primeru, da nam pomikanje robotske roke v omenjenih operacijah ne ustreza, lahko z uporabo osne operacije (ang. *join operation*) premikamo vsak sklep neodvisno od ostalih [8].



Slika 4.6: Grafični prikaz a) XYZ, b) TOOL, c) WORK in d) JOINT operacij

4.2 Učna enota R56TB

Učna enota (ang. *teaching box*) je glavna naprava, s katero upravljamo robot. Povezana je na sprednjo stran krmilnika in je namenjena izključno programerjem, operaterjem in serviserjem.



Slika 4.7: Deli učne enote R56TB

Da lahko upravljamo z učno enoto, mora biti pritisnjena tipka "TEACH" na enoti in na krmilniku nastavljen ročni način upravljanja robota.

Možnosti uporabe učne enote:

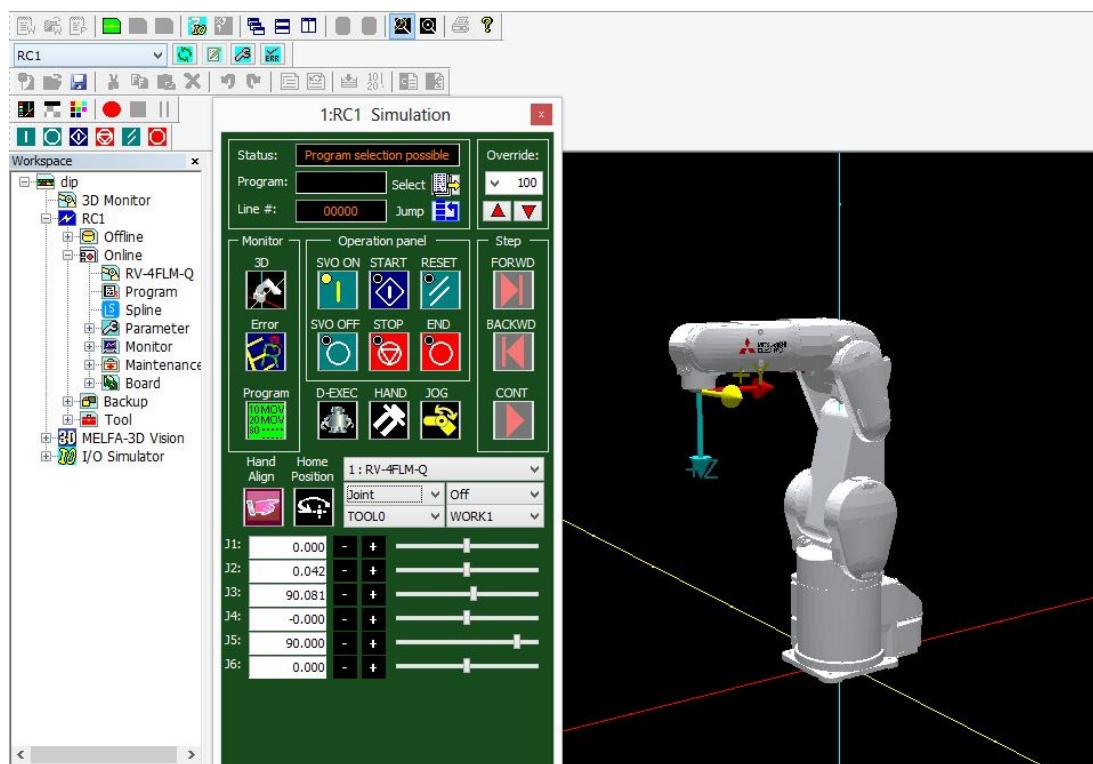
- uravnavanje hitrost robota
- pomikanje robota v ročnem načinu
- pisanje in spreminjanje programov robota
- spreminjanje in nastavljanje parametrov robota
- testiranje in odpravljanje napak robotskega programa
- preverjanje in spreminjanje vhodno-izhodnih signalov na krmilniku robota
- izvajanje diagnostike in vzdrževanja

4.3 Programska oprema RTToolBox2

Programiranje Mitsubishijevih robotov poteka v programskem okolju RTToolBox2.

Okolje ima tri glavne načine delovanja (ang. *mode*), ki so:

- "Offline mode" je način, ki omogoča pisanje in shranjevanje programske kode brez fizično prisotnega robota ali uporabe simulacije.
- "Online mode" je način, pri katerem se lahko preko različnih komunikacij povežemo z robotskim krmilnikom. Preko računalnika lahko pišemo, spreminjamo in izvajamo programsko kodo, spreminjamo parametre robota, vhodno-izhodne digitalne signale ter izvajamo diagnostiko in vzdrževanje robota. Preko online načina lahko z izjemo ročnega vodenja robota uporabljamo vse funkcije, ki jih omogoča učna enota.
- "Simulation mode" je po delovanju podoben online načinu z izjemo, da namesto fizičnega robota upravljamo z virtualnim robotom, ki deluje na principu matematičnega modela pravega robota. Ta način omogoča simuliranje in preverjanje delovanja pravega robota le z uporabo osebnega računalnika. Tako se lahko izognemo trkom realnega robota zaradi nepredvidenih programskih napak, ki jih lahko odpravimo že v simulaciji. Simulacija tako kot učna enota za realnega robota omogoča tudi ročno upravljanje virtualnega robota. Način simulacije v RTToolBox2 je prikazan na sliki 4.8.

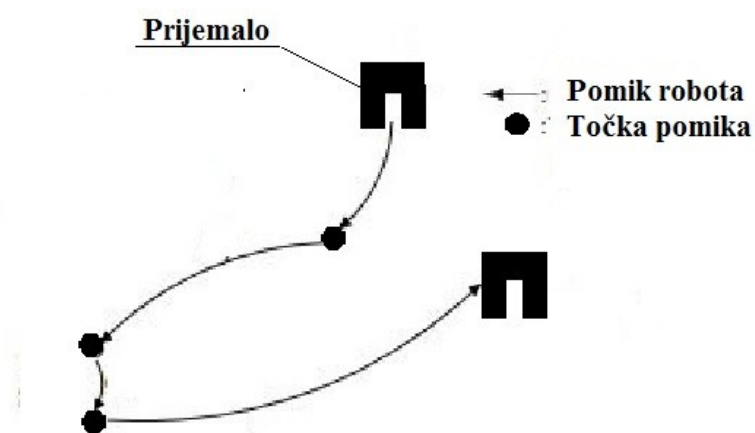


Slika 4.8: Programsko okolje RTToolBox2 v načinu simulacije

4.3.1 Programski jezik

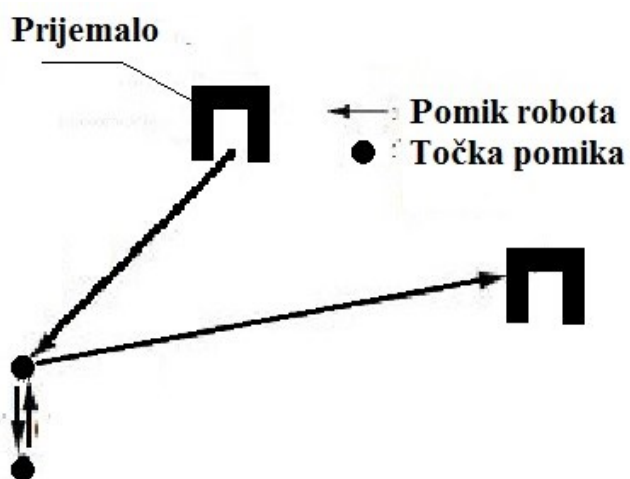
Programiranje v okolju RTToolBox2 poteka v programskem jeziku MELFA BASIC IV. Jezik temelji na visokonivojskem računalniškem programskem jeziku Visual basic, v katerem se ukazi izvajajo v določenem zaporedju. Glede na funkcionalnost se ukazi delijo na ukaze za programsko kontrolo in na ukaze za premikanje robota:

- Osnovni ukazi za premikanje robota:
 - MOV, ki omogoča osno interpolacijo. To pomeni, da se robot pomakne med dvema točkama po najhitrejši možni poti, ki jo določi sam krmilnik robota. S tem ukazom pot vrha robotske roke ne more biti popolnoma predvidena, saj se krmilnik glede na trenutno orientacijo posameznih osi robotske roke sam odloči za najbolj ustrezno trajektorijo, kot to prikazuje slika 4.9.



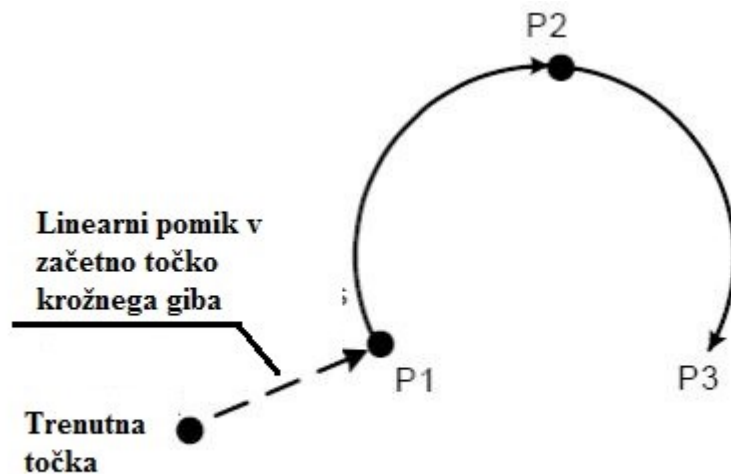
Slika 4.9: Premik robota z osno interpolacijo

- MVS, ki omogoča linearno interpolacijo. To pomeni, da se vrh robotske roke pomakne med dvema točkama po linearni oziroma ravni poti, ki jo izračuna krmilnik. Čeprav je pot najkrajša, to pri robotih po navadi pomeni daljši čas, saj mora krmilnik hkrati pomikati več osi, da lahko realizira popolnoma raven, linearni pomik vrha robota, kar prikazuje slika 4.10.



Slika 4.10: Premik robot z linearno interpolacijo

- MVR, ki omogoča tridimenzionalno krožno interpolacijo vrha robotske roke z uporabo treh točk. Od začetne točke (P1), kjer začne krožni gib, preko prehodne točke (P2) do končne točke (P3) se vrh robota pomakne po linearni poti, kar prikazuje slika 4.11.



Slika 4.11: Premik robota s krožno interpolacijo

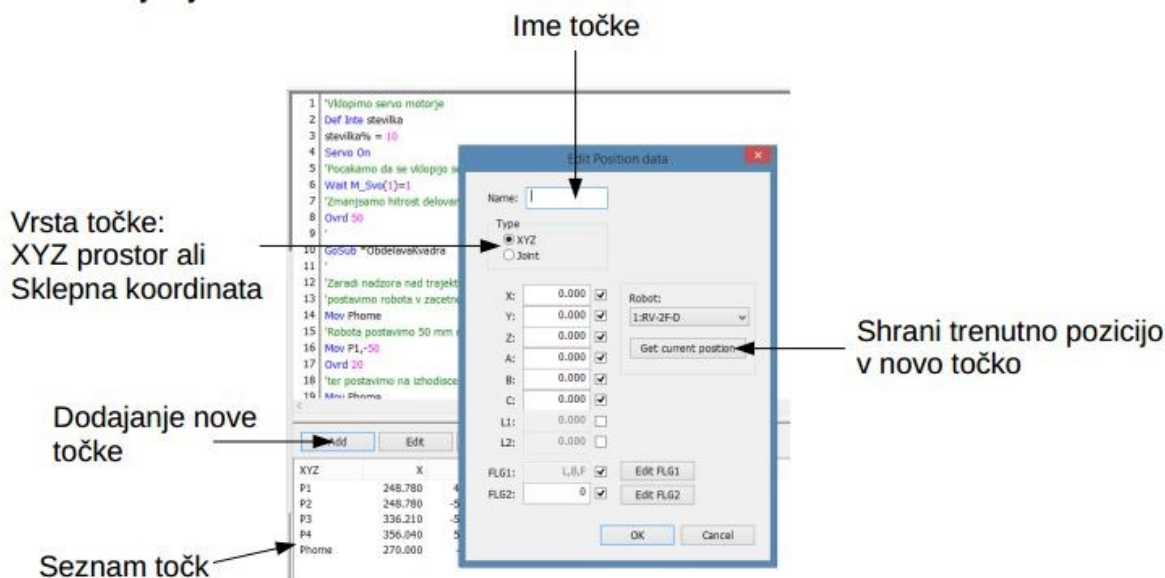
- Osnovni ukazi za programsko kontrolo:
 - GOTO je ukaz za premikanje programskega kazalca iz ene programske vrstice v drugo
 - GOSUB je ukaz za klicanje podprogramov, definiranih znotraj glavnega programa
 - CALLP je ukaz za klicanje podprogramov, definiranih izven glavnega programa
 - DLY je časovna zakasnitev izvajanja programske kode; uporablja se tudi za zagotovitev pomika robota točno v naslednjo točko.
 - END je konec programske kode enega programa
 - HOPEN je sistemski ukaz za odpiranje robotskega prijemala, priključenega na notranjo napeljavo robotske roke
 - HCLOSE je sistemski ukaz za zapiranje robotskega prijemala, priključenega na notranjo napeljavo robotske roke

- M_IN je ukaz za upravljanje digitalnih izhodnih signalov, priključenih na robotski krmilnik
- M_OUT je ukaz za upravljanje digitalnih vhodnih signalov, priključenih na robotski krmilnik

Pri testiranju vstavljanja sem moral poleg osnovnih ukazov uporabiti tudi nekaj dodatnih ukazov, in sicer:

- OVRD je ukaz za določanje hitrosti robotske roke. Vrednost hitrosti vpisujemo v procentih od najnižje do najvišje možne hitrosti robotske roke. Razpon vrednosti lahko nastavljamo po koraku 0.1 od 0.1% do 100%.
- P_Curr je ukaz za vračanje trenutne pozicije, v kateri bi se moral nahajati robot po ukaznem premiku. Razliko med ukazano in realno pozicijo lahko povzročijo dovolj velike zunanje sile, delujoče na vrh robotske roke.
- P_Fbc je ukaz, ki vrača realno trenutno pozicijo nahajanja vrha robotske roke na podlagi povratnih informacij servomotorjev. Kombinacijo tega in predhodnega ukaza lahko uporabljamo pri voljnem gibanju za ugotavljanje odstopanj pozicije vrha robotske roke, povzročenih zaradi zunanjih delujočih sil [9].

Pri uporabi ukazov za premikanje robota moramo imeti vnaprej shranjene pozicijske točke robota. Z uporabo učne enote robota ročno pomikamo vzdolž trajektorije zahtevanega gibanja v robotski celici in med gibanjem shranjujemo potrebne točke. Shranjevanje in tudi kasnejše spreminjanje točk lahko opravljamo preko učne enote ali pa v programskem okolju RTToolBox2, kar prikazuje slika 4.12.



Slika 4.12: Shranjevanje in urejanje pozicij robota v okolju RTToolBox2

4.4 Vgrajena funkcija za zagotavljanje programirane aktivne voljnosti robotske roke brez uporabe senzorja sile (ang. *compliance control*)

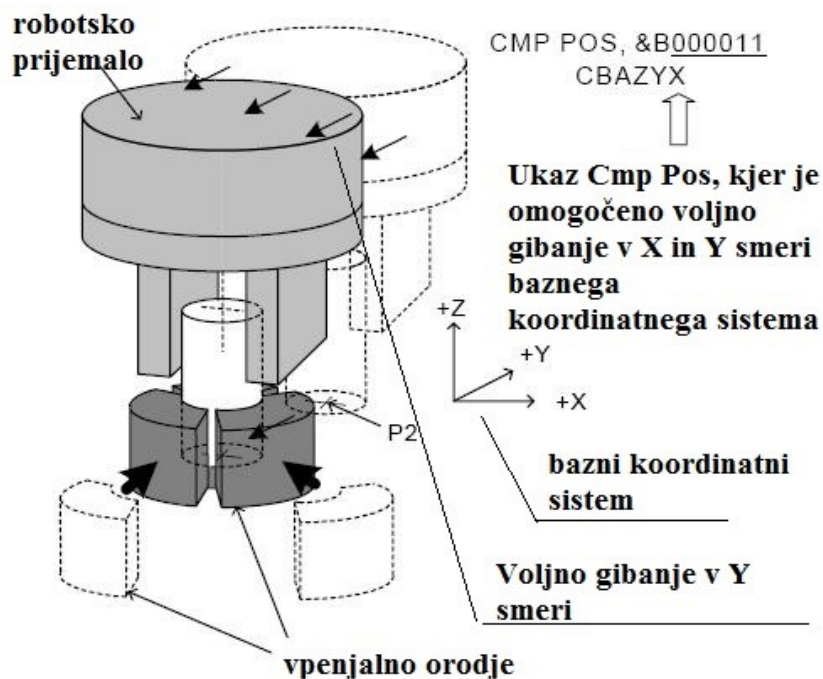
Uporabljeni robot RV-4FLMQ ima serijsko vgrajeno funkcijo za zagotavljanje programirane aktivne voljnosti robotske roke brez uporabe senzorja sile imenovano "compliance control". Funkcija preko določenih ukazov in parametrov omogoča vklop in nastavljanje voljnega gibanja vrha robotske roke. Pri določanju koordinatnega sistema voljnega gibanja lahko izbiramo med tremi operacijami premikanja robotske roke [9].

4.4.1 Voljno gibanje z uporabo XYZ operacije (ang. *composition posture*)

Z uporabo operacije XYZ lahko dosežemo voljno gibanje vrha robotske roke vzdolž osi kartezičnega baznega koordinatnega sistema v eni ali več smereh, kar prikazuje slika 4.13. Za vklop take vrste voljnega gibanja uporabimo naslednji ukaz:

Cmp Pos, <Axis designation>

kjer pri parametru <Axis designation> z bitnim zaporedjem (&B00000000) določimo smeri voljnega gibanja (1 : Vklop smeri, 0 : Izklop smeri). Bitno zaporedje ustreza osem kartezičnega baznega koordinatnega sistema v zaporedju L2L1CBAZYX.



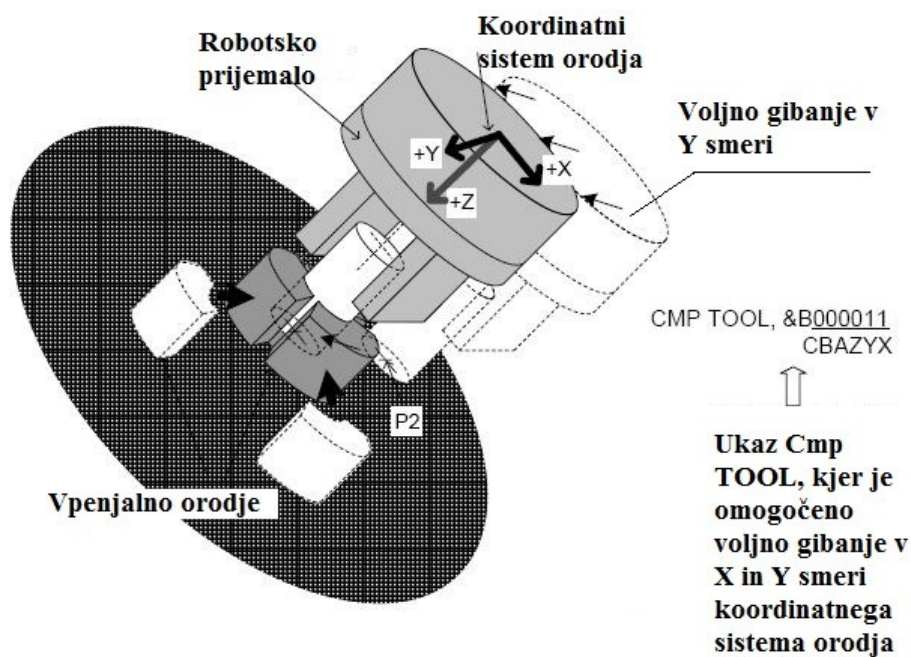
Slika 4.13: Voljno gibanje z uporabo XYZ operacije

4.4.2 Voljno gibanje z uporabo operacije orodja (ang. *composition tool*)

Z uporabo operacije orodja lahko dosežemo voljno gibanje vrha robotske roke vzdolž osi kartezičnega koordinatnega sistema orodja v eni ali več smereh, kar prikazuje slika 4.14. Za vklop take vrste voljnega gibanja uporabimo naslednji ukaz:

Cmp TOOL, <Axis designation>

kjer pri parametru <Axis designation> z bitnim zaporedjem (&B00000000) določimo smeri voljnega gibanja (1 : Vklop smeri, 0 : Izklop smeri). Bitno zaporedje ustreza osem kartezičnega koordinatnega sistema orodja v zaporedju L2L1CBAZYX.



Slika 4.14: Voljno gibanje z uporabo TOOL operacije

4.4.3 Voljno gibanje z uporabo osne operacije (ang. *composition joint*)

Z uporabo osne operacije lahko dosežemo voljno gibanje posameznega sklepa robotske roke ter posredno vplivamo na voljno gibanje vrha robotske roke. Za vklop take vrste voljnega gibanja uporabimo naslednji ukaz:

Cmp Joint, <Axis designation>

kjer pri parametru <Axis designation> z bitnim zaporedjem (&B00000000) določimo osi voljnega gibanja (1 : Vklop osi, 0 : Izklop izklop). Bitno zaporedje ustreza sklepom robotske roke v zaporedju 87654321.

4.4.4 Togost robotske roke pri voljnem gibanju

Poleg vklopa in nastavljanja smeri voljnega gibanja v koordinatnem sistemu funkcija z ukazom CmpG omogoča nastavljanje togosti vrha robotske roke pri voljnem gibanju. Glede na poglavje 4.2.1 parametri <axis gain> znotraj ukaza Cmpg pomenijo okrepitev kontrolnih pozicijskih zank po vsaki osi posebej. Z zmanjševanjem vrednosti ojačitve tako dosegamo večje prilaganje vrha oziroma manjšo togost robotske roke. Vrednost parametra lahko nastavljamo od najmanjše togosti, ki je 0.01, vse do največje togosti, ki je 1 po koraku 0.01.

Parametri ukaza CmpG:

CmpG [<X axis gain>], [<Y axis gain>], [<Z axis gain>], [<A axis gain>], [<B axis gain>], [<C axis gain>],

- [<X axis gain>] Parameter določa ojačitev vzdolž X osi kartezičnega koordinatnega sistema.
- [<Y axis gain>] Parameter določa ojačitev vzdolž Y osi kartezičnega koordinatnega sistema.

- [**<Z axis gain>**] Parameter določa ojačitev vzdolž Z osi kartezičnega koordinatnega sistema.

- [**<A axis gain>**] Parameter določa ojačitev okoli X osi kartezičnega koordinatnega sistema.

- [**<B axis gain>**] Parameter določa ojačitev okoli Y osi kartezičnega koordinatnega sistema.

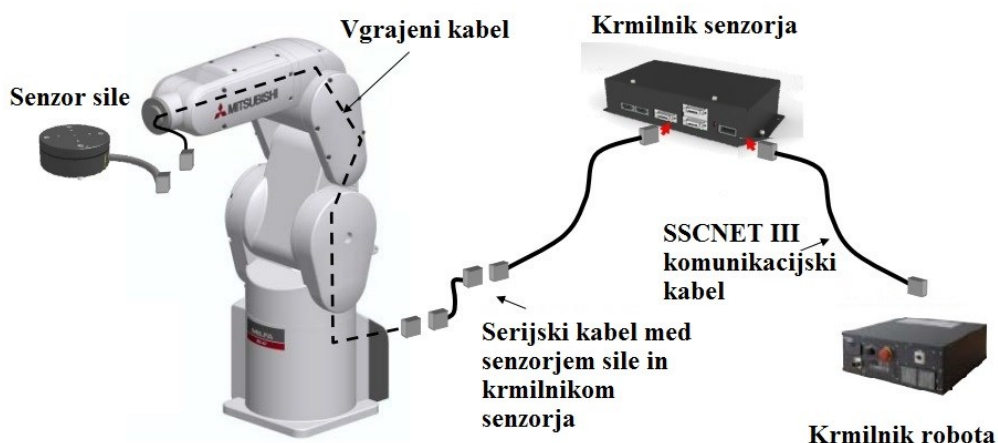
- [**<C axis gain>**] Parameter določa ojačitev okoli Z osi kartezičnega koordinatnega sistema.

4.4.5 Delovanje funkcije za zagotavljanje programirane aktivne voljnosti robotske roke brez uporabe senzorja sile

Po uporabi ukazov CMP POS, CMP TOOL in CMP JOINT voljno gibanje robotske roke ostane vklopljeno vse do izklopa krmilnika ali pa uporabe namenskega ukaza za izklop CMP off. Med delovanjem voljnega gibanja ne moremo menjati koordinatnih sistemov. Lahko pa spreminjamo smeri in togost voljnega gibanja robotske roke. V primeru sočasne uporabe omenjene funkcije z nekaterimi drugimi funkcijami, kot je detekcija trkov, krmilnik robota avtomatsko generira napako, saj funkcij ne moremo uporabljati hkrati.

4.5 Oprema za zagotavljanje programirane aktivne voljnosti robotske roke z uporabo senzorja sile

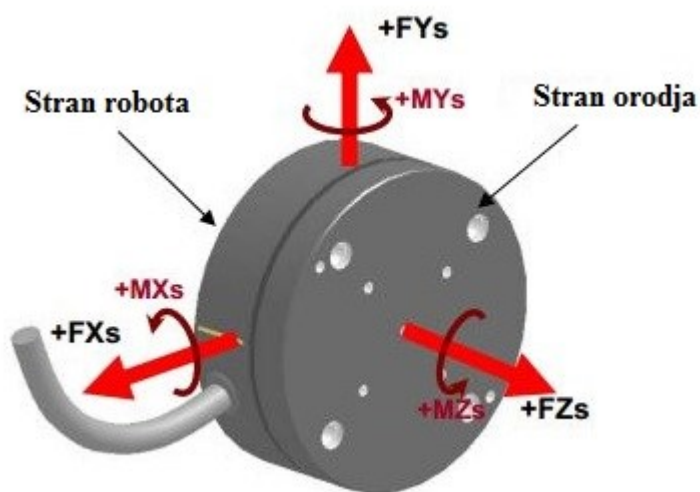
V skladu s poglavjem 3.4.2 potrebujemo za zagotavljanje programirane aktivne voljnosti senzor sile, logično programirljiv krmilnik, komunikacijsko opremo za pošiljanje informacij sil in navorov iz senzorja v robotski krmilnik in eno od regulacij. Pri mojem testiranju je bil uporabljen produkt proizvajalca Mitsubishi electric, imenovan »force sense function«, ki je namenjen izključno za uporabo v kombinaciji z Mitsubishijevimi industrijskimi roboti. Prednost uporabe takega produkta je, da vsebuje že vse potrebne elemente in je sistemsko popolnoma podprt s strani robota, kar pomeni enostavno montažo in vzpostavitev delovanja z robotom. Izdelek vsebuje senzor sile 1F-FS001-W200, namenski krmilnik 2F-TZ561 in set komunikacijskih kablov. Kot vidimo na sliki 4.15, je senzor sile pritrjen na vrh robota in s serijskim kablom priklopljen na namenski krmilnik senzorja. Kabel lahko napeljemo ob robotski roki ali pa preko notranje napeljave, ki jo omogoča robotska roka. Namenski krmilnik je nato povezan direktno na robotski krmilnik preko optične komunikacije SSCNET III [10].



Slika 4.15: Vežalna shema Mitsubishijeve opreme za zagotavljanje programirane aktivne voljnosti robotske roke z uporabo senzorja sile

4.5.1 Senzor sile 1F-FS001-W200

Senzor 1F-FS001-W200 je senzor sile s šestimi prostorskimi stopnjami. Slika 4.16 z oznakami (F_x, F_y, F_z) prikazuje smeri merjenih sil v kartezičnem koordinatnem sistemu. Z oznakami (M_x, M_y, M_z) pa prikazuje navorov pri rotacijah okoli XYZ osi koordinatnega sistema. [10]



Slika 4.16: Smeri sil in navorov, merjenih s senzorjem sile 1F-FS001-W200

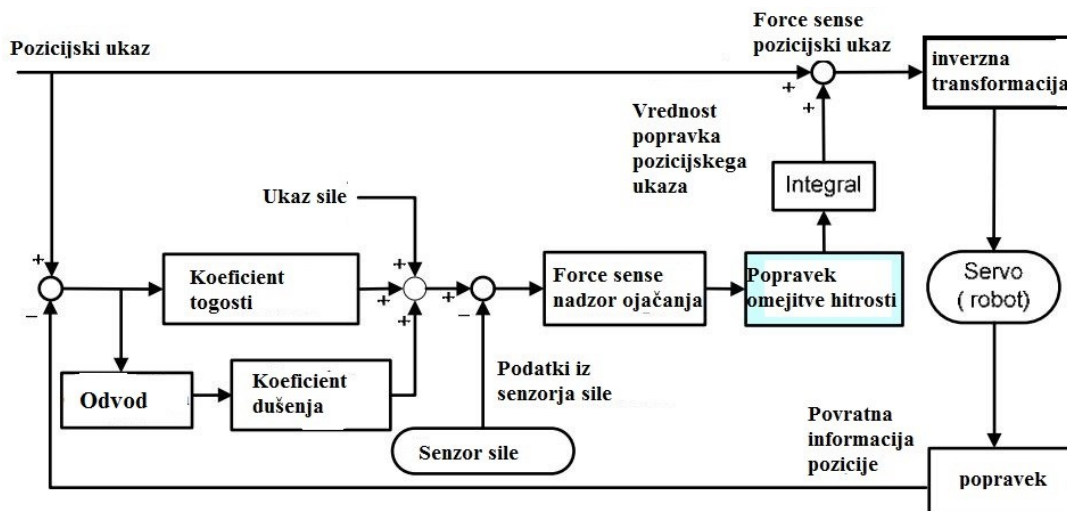
Pri uporabi senzorja sile moramo upoštevati določene parametre, kot so nominalna in največja dovoljena obremenitev ter ločljivost senzorja. Vrednosti parametrov prikazuje tabela 4.1 [10].

Parameter	Smeri sil in navorov	Enote	Vrednost
Nominalna obremenitev	F_x, F_y, F_z	N	200
	M_x, M_y, M_z	Nm	4
Največja dovoljena obremenitev	F_x, F_y, F_z	N	1000
	M_x, M_y, M_z	Nm	6
Resolucija senzorja	F_x, F_y, F_z	N	Pribl. 0.03
	M_x, M_y, M_z	Nm	Pribl. 0.0006

Tabela 4.1: Vrednost parametrov senzorja sile

4.5.2 Namenski krmilnik 2F-TZ561

V poglavju 3.4.1 o zagotavljanju programirane aktivne voljnosti je razložen osnovni postopek izdelave regulacijskega krmilnika na podlagi pridobljenih informacij sil in navorov iz motorjev v sklepih. Pri uporabi senzorja sile vse omenjene informacije pridobivamo direktno iz senzorja, vendar prav tako potrebujemo regulacijo za povratnozančno vodenje servomotorjev. V skladu z [11] regulacijo opravljata krmilnika CR-750-Q in 2F-TZ561 preko optične komunikacije SSCNET III. Bločni diagram regulacije prikazuje slika 4.17.



Slika 4.17: Bločni diagram regulacije "force sense" opreme

4.5.3 Programska uporaba opreme za zagotavljanje programirane aktivne voljnosti robotske roke z uporabo senzorja sile

Senzor sile lahko zaradi popolne systemske podprtosti navedljamo direktno preko parametrov robota. Tako je mogoče opravljati celotno programiranje aktivne voljnosti z uporabo senzorja sile v programskem okolju robota. V okolju RTToolBox2 imamo za implementacijo aplikacije z uporabo senzorja sile poleg parametrov senzorja na voljo tudi širok nabor integriranih funkcij, ki delujejo na podlagi vgrajene regulacije, opisane v prejšnjem podpoglavju.

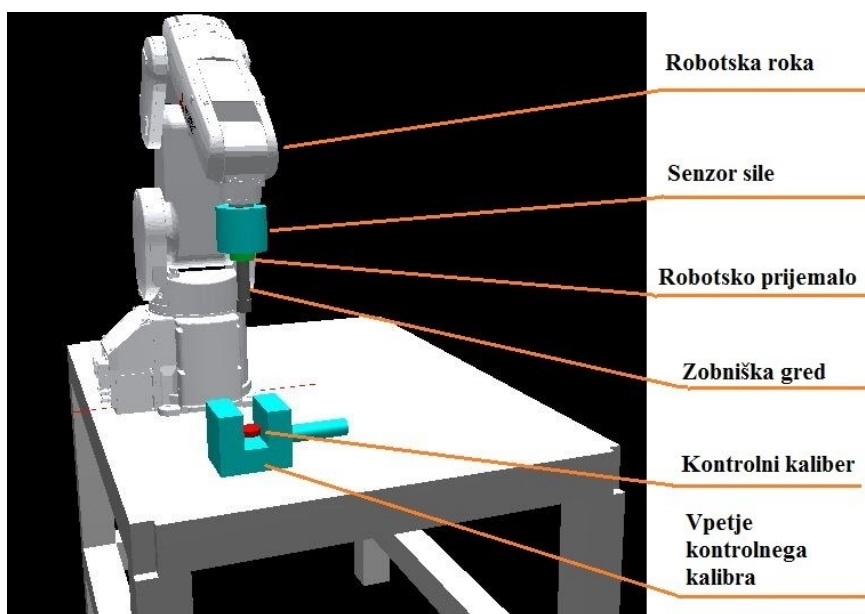
Integrirane programske funkcije za upravljanje s senzorjem sile:

- Nadzor sile (ang. *force control*) krmili robota, da vedno potiska le z določeno silo v želeni smeri. To pomeni, da se robot samodejno pomika v položaj, v katerem je mogoče pridobiti določeno reakcijo sile.
- Nadzor togosti (ang. *stiffness control*) deluje na enak način kot vgrajena funkcija, opisana v poglavju 4.4, kar pomeni, da vrh robotske roke deluje kot vzmet.

- Zaznavanje sile (ang. *force sense detection*) lahko uporabimo v primeru, ko zgornje funkcije ne odgovarjajo za naš tip aplikacije. S to funkcijo lahko uporabljamo direktne informacije sil iz senzorja v lastnih programskih procedurah, kako naj se obnaša robot v primeru fizičnega kontakta. Funkcijo lahko uporabljamo tudi v kombinaciji s prekinitvenimi rutinami.

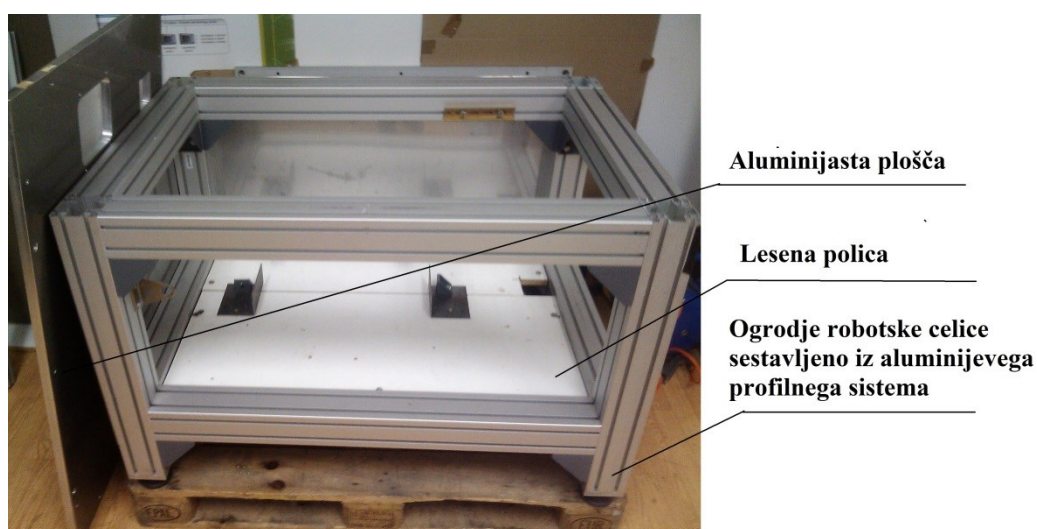
5 Robotska celica za avtomatsko vstavljanje

Celotna oprema za avtomatizacijo proizvajalca Mitsubishi electric je bila zagotovljena s strani podjetja Inea Rbt d.o.o., kjer je bila tudi izvedena izdelava in testiranje robotskega vstavljanja zobniške gredi v kontrolni kaliber. Robotska celica je za namene testiranja vsebovala le najosnovnejše gradnike, potrebne za preverjanje, ali je možno realizirati vstavljanje gredi z uporabo industrijskega robota, kar prikazuje slika 5.1. Prvotno je bilo zasnovano testiranje vstavljanja gredi samo v prvi kontrolni kaliber, namenjen preverjanju predebelih zobniških gredi. Zato je bila predvidena izdelava samo enega vpetja kontrolnega kalibra.



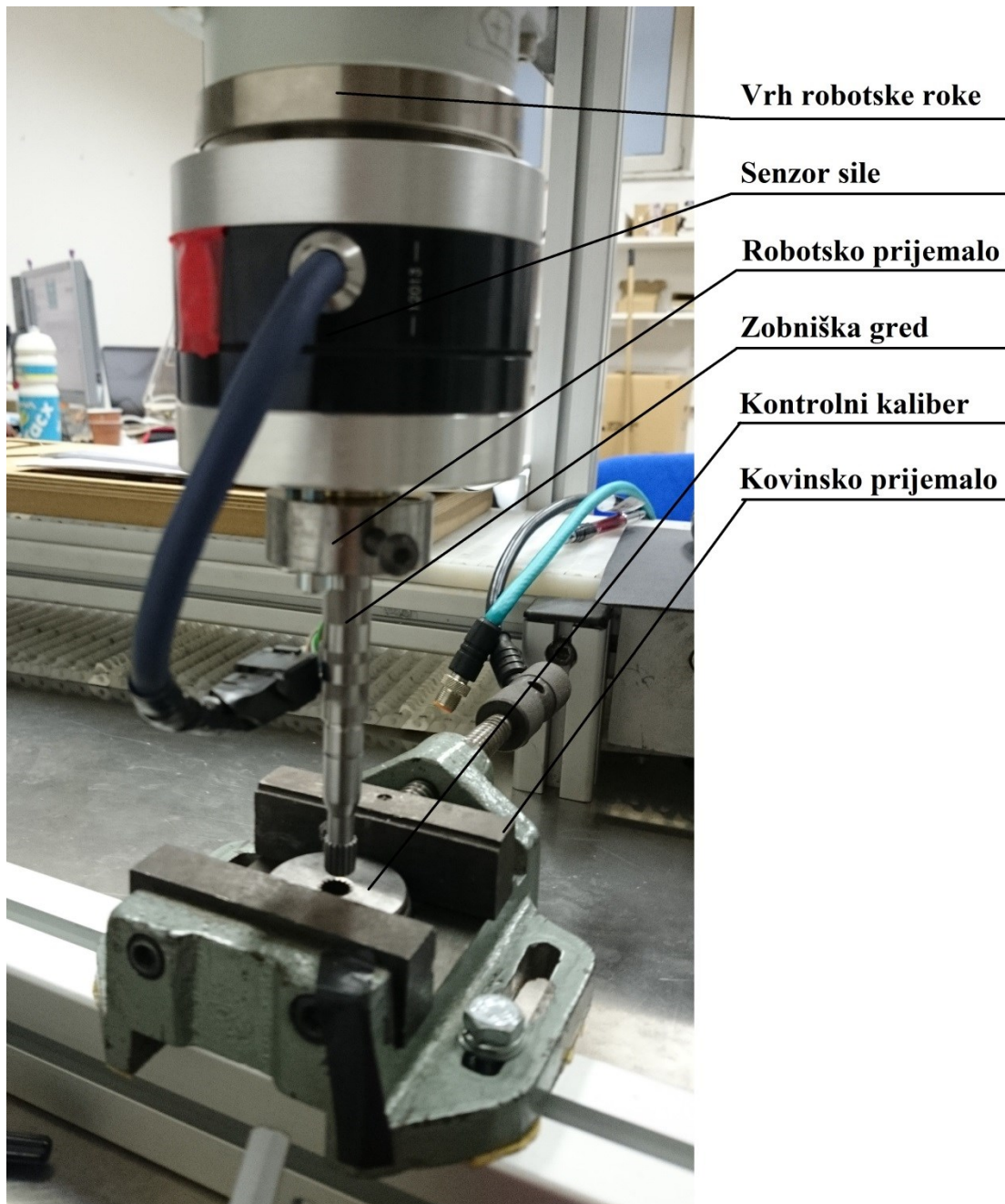
Slika 5.1: Osnovni gradniki robotske celice

Ogrodje robotske celice je bilo sestavljeno iz Aluminijevega profilnega sistema, na katerem je bila nameščena aluminijasta plošča; to prikazuje slika 5.2. Na ploščo sta bila pritrjena robotska roka RV-4FLM in kovinsko prijemalo, namenjeno vpetju kontrolnega kalibra. Naklon orodja in podnožja robotske roke je bil preverjen z uporabo profesionalne vodne tehtnice nemškega proizvajalca Elmag, pri kateri je natančnost merjenja naklonov 0.02mm.



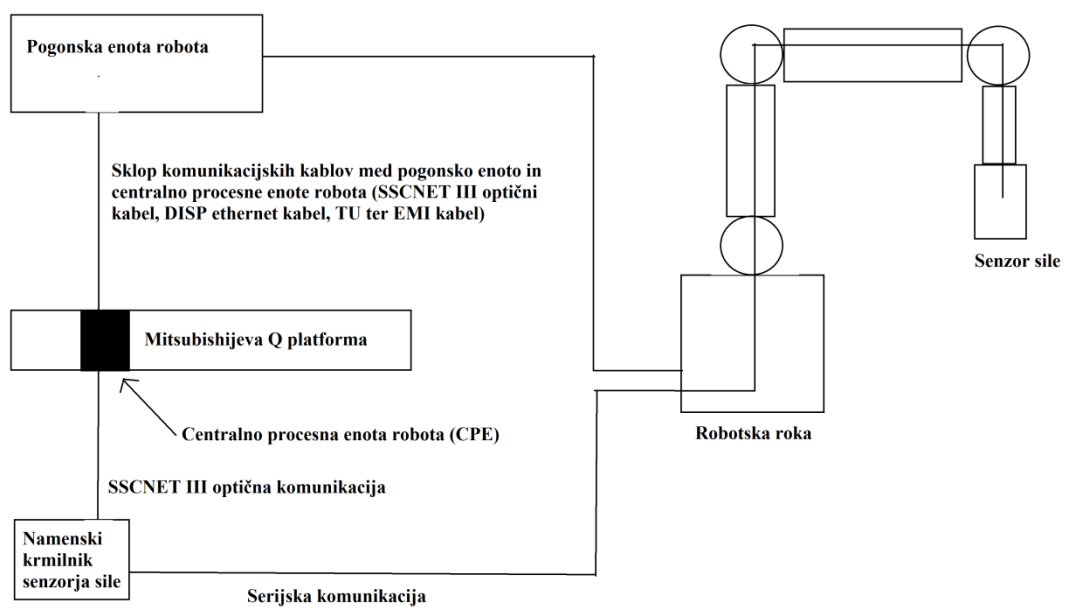
Slika 5.2: Prikaz robotske celice med izdelavo

Na vrh robotske roke je bil pritrjen senzor sile 1F-FS001-W200, na katerega je bilo nato pritrjeno robotsko prijemalo. Ker se je aplikacija izdelovala zgolj za testiranje, je bilo odločeno, da izdelam in uporabim preprosto kovinsko prijemalo, v katerem se zamenjava zobniške gredi opravlja ročno. Na sliki 5.3 vidimo vrh robotske roke, na katerem sta montirana senzor sile in končno izdelano prijemalo z že vpeto zobniško gredjo. Prav tako je na sliki vidno kovinsko prijemalo, v katerega je vpet kontrolni kaliber.



Slika 5.3: Prikaz končne montaže senzora sile in robotskega prijemala na vrh robotske roke, postavljenega nad kontrolnim kalibrom vpetega v kovinsko prijemalo

Pod aluminijasto ploščo sta bila na leseno polico nameščena krmilnika CR-750-Q in 2F-TZ561. Komunikacija uporabljene opreme je bila že opisana v poglavju 4, končno shemo komunikacijskih povezav v robotski celici pa prikazuje slika 5.4.

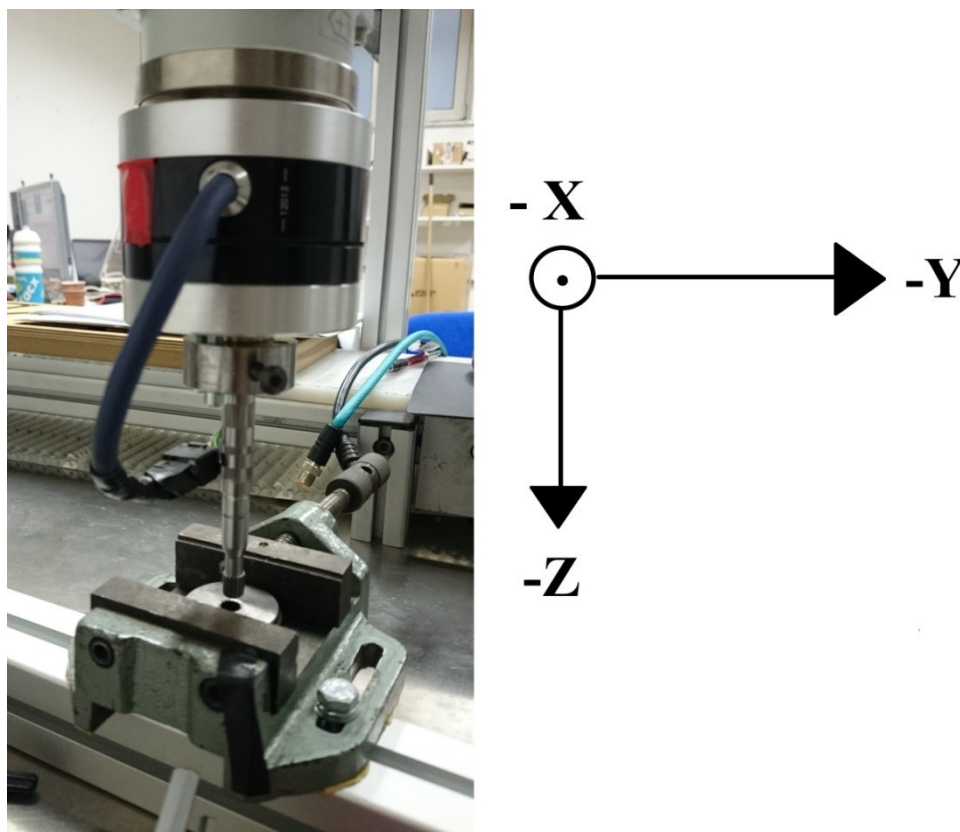


Slika 5.4: Shema komunikacijskih povezav v robotski celici

6. Robotsko vstavljanje gredi v prvi kontrolni kaliber

6.1 Postopek robotskega vstavljanja v prvi kaliber

Pomikanje gredi je pri robotskem vstavljanju potekalo v kartezičnem koordinatnem sistemu podnožja; smeri prikazuje slika 6.1.



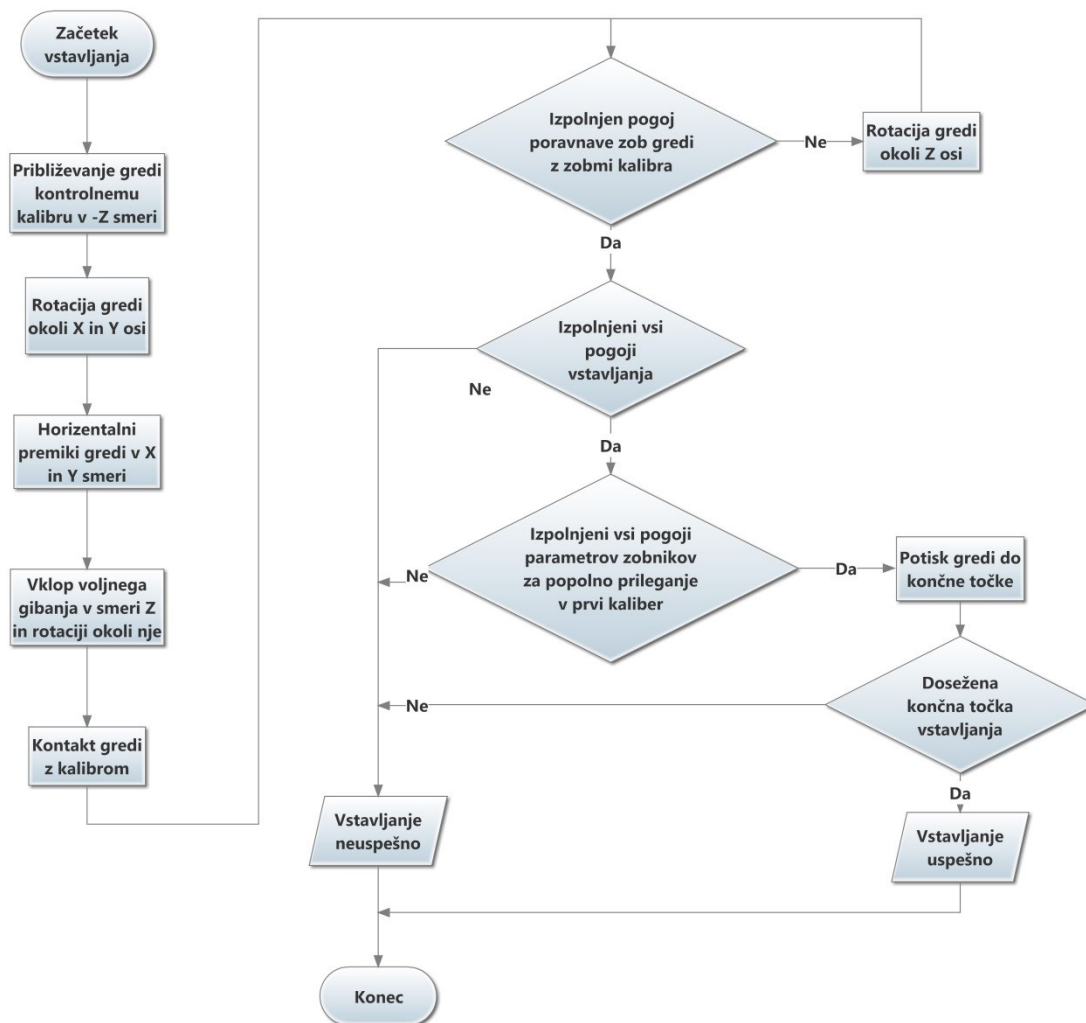
Slika 6.1: Prikaz smeri pomikanja v kartezičnem koordinatnem sistemu podnožja robotske roke

V podpoglavju 2.3 opisani pogoji za uspešno ročno vstavljanje zobniške gredi v kontrolni kaliber veljajo tudi za robotsko vstavljanje. Če postopek vstavljanja razložimo v kartezičnem koordinatnem sistemu, bi vstavljanje potekalo v vertikalni smeri, tj. v $-Z$ smeri glede na sliko 6.1. Preostali dve smeri X in Y na sliki predstavljata horizontalno pomikanje. Iz podpoglavja 2.3 bi pri prvem pogoju dosegli ohranjanje pravokotnosti med gredjo in kalibrom s pravilnimi rotacijskimi premiki gredi okoli osi X in Y , pri drugem pogoju pa bi za poravnavo središč potrebovali horizontalne premike gredi v smeri X in Y . Poravnavo zob v tretjem koraku bi dosegli z rotacijo gredi okoli vertikalne smeri Z .

Za zagotavljanje omenjenih pogojev moramo pri robotskem vstavljanju predhodno vedno poznati točne koordinate pozicij gredi in kalibra. Pri fiksnem vpetju kalibra imamo vedno znane točne koordinate središča kalibra v koordinatnem sistemu XYZ , saj kaliber po vsaki kontroli gredi vedno ostane na isti poziciji. Pri gredi bi z ustreznim podajalnim sistemom morali zagotoviti točno pozicijo gredi, tako da bi robot lahko vsakokrat s prijemalom pravilno zagrabil gred. Tako bi pri procesu vstavljanja z notranjimi pozicijskimi senzorji robotske roke natančno poznali pozicijo gredi glede na kaliber. Vendar smo pri ponovljivosti podajalnega sistema gredi predpostavili slabo ponovljivost rotacije gredi okoli svojega središča. To pomeni, da imamo pri gredi točno znane samo vrednosti pozicij koordinat XYZ in dveh rotacij okoli osi X in Y . Rotacija okoli osi Z je vedno popolnoma naključna, kar za nas pomeni nepravilno poravnavo zob gredi z zobmi kontrolnega kalibra. Tako bi lahko prva dva pogoja z znanimi koordinatami zobniške dvojice izpolnili brez težav, zadnjega pogoja pa zaradi neznane rotacije gredi ne bi mogli izpolniti. Glede na tretje poglavje pa geometrijski zamik čepa, oziroma v našem primeru nepopolnega prileganja zob, pomeni neuspešno izvedeno vstavljanje oziroma trk robota v kontrolni kaliber. Tako je v našem primeru uporaba voljnega gibanja robotske roke nujno potrebna, saj pri robotskem trku sile hitro presežejo dovoljene vrednosti trdote zobniške gredi, opisane v podpoglavju 2.3.

Po navadi se voljno gibanje robotske roke pri vstavljanju čepa uporablja v kombinaciji z ustrezno obliko čepa ali luknje. Tako imata čep ali luknja obliko konusa, kjer ob geometrijskem zamiku čep po konusu zdrsne v luknjo, prileganje čepa pa zagotovi voljno gibanje robota. V našem primeru voljnega gibanja ne bi uporabili za prileganje čepa po konusu, temveč ga bi uporabili za omejitev sile v vertikalni smeri Z pri kontaktu gredi s kalibrom v primeru nepravilnega prileganja, povzročenega zaradi naključne rotacije središča gredi. Ob poravnavi zob bi bila pravilno izdelana gred potisnjena v končno točko vstavljanja, ki je določena na dnu kontrolnega kalibra. To zagotovimo po principu Hookovega zakona o elastičnih telesih, po katerem robot, ki deluje kot vzmet, ob odstranitvi ovire sili nazaj v referenčno točko. Poravnava zob bi bila dosežena z rotacijo gredi okoli osi Z toliko časa, dokler se zobje ne bi poravnali. Pri rotaciji moramo upoštevati, da pride pri poravnavi lahko do zataknitve zob gredi z zobmi kalibra. Tako moramo pri vklopu voljnega gibanja v vertikalni smeri Z predvideti tudi voljno gibanje rotacije okoli osi Z, s čimer bi pri zataknitvi omejili prekomerne sile okoli osi Z.

Postopek robotskega vstavljanja v prvi kontrolni kaliber, opisanega v tem podpoglavju, prikazuje diagram poteka na sliki 6.2.



Slika 6.2: Diagram poteka robotskega vstavljanja v prvi kontrolni kaliber

Teoretično bi morale biti pri izpolnjevanju vseh pogojev vstavljanja in pravilno izdelani gredi, kot so opisani v drugem poglavju, opravila vstavljanja vedno uspešno. Če v praksi pri vsaki gredi z robotom zagotovimo vse pogoje vstavljanja, lahko v primeru neuspešnosti opravila vstavljanja predpostavimo, da je vzrok za to nepravilno izdelana gred. Na podlagi te predpostavke sem razvil in testiral program za končno kontrolo predebele zobniške gredi.

6.2 Razvoj programa za vstavljanje z uporabo vgrajene funkcije

Razvoj programa za vstavljanje gredi sem izvedel v štirih korakih. V prvem koraku sem z uporabo vgrajene funkcije spisal podprogram za voljno gibanje robotske roke v koordinatnem sistemu podnožja. V podprogramu sem za vklop take vrste voljnega gibanja uporabil ukaz Cmp Pos. Pri tem sem pri parametru <Axis designation> z bitnim zaporedjem &B00100100 vklopil voljno gibanje v vertikalni smeri Z in rotaciji okoli iste osi. Poleg vklopa smeri sem z ukazom Cmpg, opisanem v podpoglavju 4.4.4, začasno nastavil skoraj najmanjšo togost robotske roke, pri tem sem v njegove parametre vstavil vrednost 0.2 za obe koordinati. Napisani podprogram sem nato izvedel in tako vklopil voljno gibanje. S pritiskom lastne sile na vrh robotske roke v vseh smereh koordinatnega sistema sem lahko preveril delovanje voljnega gibanja, določenega s podprogramom. Napisani podprogram prikazuje slika 6.3.

```
*voljnogibanje
CmpG „0.1,,,0.1,, ‘ Nastavitev manjše togosti v koordinatah Z in C
‘x,y,z,a,b,c <- zaporedje smeri in rotacij
Cmp Pos, &B100100 ‘ Vkllop voljnega gibanja z operacijo XYZ v koordinatah Z in C
‘c,b,a,z,y,x <- zaporedje smeri in rotacij
Return ‘ Konec podprograma
```

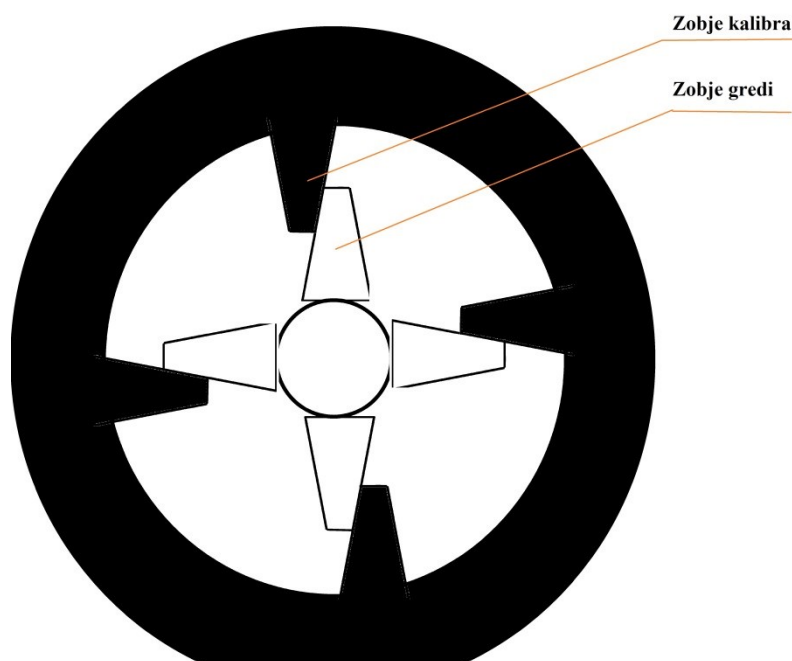
Slika 6.3: Podprogram za vklop vgrajene funkcije voljnega gibanja

Drugi korak je bil namenjen praktičnemu preverjanju teoretičnega postopka robotskega vstavljanja, opisanega v prejšnjem podpoglavju. Z uporabo učne enote in ročnega vodenja robota sem vstavljajal gred v kaliber po postopku, prikazanem na sliki 6.2. Najprej sem z robotom pripeljal gred tik nad kontrolni kaliber. Ker sem poznal točne koordinate središča kalibra ter koordinate vpete gredi sem lahko izpolnil pogoje pravokotnosti in poravnave središč. Koordinate vpete gredi sem pridobil z ukazom P_curr. Z voljnim gibanjem in linearno interpolacijo robota sem gred počasi spuščal, dokler nisem vzpostavil kontakta. Na tej točki sem ponovno preveril delovanje voljnega gibanja v smeri Z, in sicer tako: ukaza P_curr in P_fbc sta kazala

iste vrednosti v Z koordinati. To je pomenilo, da delujoče sile na robota še niso bile dovolj velike, da bi povzročilo manjši prilagoditveni premik robotske roke v smeri Z. Glede na to sem z linearnim premikom v smeri Z poizkusil spustiti gred v kaliber za 3 mm. Ker pogoj poravnave zob še ni bil izpolnjen, nižji spust gredi ni bil možen. Brez uporabe voljnega gibanja robota bi v tem trenutku prišlo do prekomernih sil v vertikalni smeri. Prekomerne sile bi opazili v obliki avtomatskega zasilnega izklopa servomotorjev robotske roke zaradi preobremenjenosti. Po odstranitvi gredi bi prav tako opazili fizične poškodbe zobniške dvojice, kar se v našem primeru ni zgodilo. Pri ponovni primerjavi ukaza P_{curr} , ki je v koordinati Z kazal vrednost 242 mm, in ukaza P_{fbc} (ta je kazal 245 mm) je bila razlika vrednosti približno 3 mm. Ta razlika je pomenila razdaljo prilagoditvenega premika robotske roke v smeri Z. V nadaljevanju sem z vizualnim pregledom določil približno rotacijo gredi okoli osi Z, potrebno za izpolnitev pogoja poravnave zob. Po poravnavi se je gred pomaknila v kaliber za 3.0 mm v $-Z$ smeri, s čimer je bila dokazana vzmetna lastnost robota zaradi delovanja voljnega gibanja. Po potrditvi delovanja voljnega gibanja sem nadaljeval s spuščanjem gredi, dokler nisem dosegel dna kalibra ter tako dobil končno točko vstavljanja, ki sem jo tudi shranil. Med spuščanjem sem po potrebi opravljal manjše popravke smeri po vseh koordinatah, da sem gred čim natančneje vstavil v prvi kaliber. Premike v vseh koordinatah sem opravljal postopoma in po koraku 0.01 mm. Vrednosti koordinat končne točke vstavljanja so po zaporedju smeri in rotacij XYZABC: 0, -450.97, 235, 180, 0, 28. Pri tem je oznaka A rotacija okoli osi X, oznaka B rotacija okoli osi Y ter C rotacija okoli osi Z. Vrednosti koordinat točke kontakta pa so po zaporedju smeri in rotacij XYZABC: 0, -450.97, 245, 180, 0, 28.

V tretjem koraku sem izdelal podprogram za avtomatsko rotiranje gredi okoli osi Z pri vzpostavljenem kontaktu. V najslabšem primeru poravnosti zob moramo opraviti rotacijo za vsaj en prehod zoba, kar prikazuje slika 6.4. Potrebna rotacija za en prehod zoba se določi na podlagi dejstva, da so zobje gredi in kalibra enakomerno razporejeni po celotnem obodu. Tako sem izračunal rotacijo, ki je bila 22.5 stopinj, na podlagi deljenja oboda, ki je 360 stopinj, s številom zob, ki je v obeh primerih 16. Pri vrtenju gredi je bilo treba upoštevati tudi zakasnitev med poravnavo in padcem

gredi v luknjo. Kajti če bi se v primeru padca gredi v kaliber vrtenje nadaljevalo še naprej, bi lahko prišlo do zatika gredi v kalibru. Rotacija +C smeri se je tako od 0° do 22.5° izvajala po koraku 1° . Zakasnitev je bila z ukazom DLY določena na 0.1 sekunde. Podprogram, prikazan na sliki 6.5, je vseboval prištevanje stopinj k rotaciji, izvedeni v glavnem programu, in štetje števila vrtenj.



Slika 6.4: Prikaz najslabšega primera poravnosti ter potrebne rotacije za celotni prehod enega zoba

```
*rotacija ' podprogram rotacija
stevlorot#=stevlorot + 1 'spremenljivka za sledenje števila prišteti stopinj
Pvrtenje.C=Pvrtenje.C + Rad(1) ' prištevanje stopinj k točki za vrtenje
return ' konec podprograma
```

Slika 6.5: Podprogram rotacije

Tretji korak je vseboval izdelavo glavnega programa, uporabljenega za robotsko vstavljanje. Vseboval je ukaze za premikanje in oba opisana podprograma. Vseboval je tudi pogoje, kdaj naj se opravlja rotacija okoli osi Z in kdaj je vstavljanje uspešno.

Glede na to, da moramo kontrolo opravljati po celotni površini zob, moramo zagotoviti vstavev celotnega zobnika na gredi v kaliber. Višina ozobja kalibra je 10 mm, višina ozobja gredi pa 9 mm, kar pomeni, da imamo možnost največje napake v vertikalni smeri natanko 1 mm med dnom kalibra in končno pozicijo gredi po vstavljanju. Tako sem uspešnost vstavljanja določil pri maksimalni višini 236 mm. Del glavnega programa prikazuje slika 6.6.

```
Mov Pvstavljanje,-20 'pomik gredi 20mm nad končno točko vstavljanja
Mvs Pvstavljanje,-12 'pomik gredi 2mm nad kontrolnim kalibrom
Dly 0.1 'zakasnitev 0.1s (zagotovitev, da se robot popolnoma ustavi v prejšnji točki (Mvs Pvstavljanje,-12))
Gosub *voljnogibanje 'skos v podprogram voljnogibanje (vklop voljnega gibanja)
*ponovniizkus 'skok programskega kazalca v 5. vrstico za ponovni izkus vstavljanja z prišteto rotacijo
Mvs Pvstavljanje + Pvrtenje 'poizkus linearnega pomika robota v končno točko z prišteto rotacijo iz podprograma 'rotacija'
Dly 0.1
If stevilorot < 23 then 'pogoj za preverjanje ali je C rotacija že preseгла 23 stopinj v primeru da je preskoči vstavljanje
Pvisina1=P_Fbc 'Pridobitev vrednosti trenutne pozicije nahajanja gredi
If (Pvisina1.Z < 244) Then Gosub *rotacija 'če je bila gred potisnjena v kaliber preskoči prištetevanje rotacije
If (Pvisina1.Z > 244) Then Goto *ponovniizkus 'če je bila gred potisnjena za vsaj milimeter preskoči ponovno vrtenje gredi
Endif 'konec pogoja za preverjanje presega rotacije za 23 stopinj
Dly 1 'zakasnitev za 1s (zagotovitev, da bo preteklo dovolj časa za potisk gredi v končno točko)
Pvisina2=P_Fbc 'Pridobitev vrednosti trenutne pozicije nahajanja gredi
If (Pvisina2.Z<236) Then 'pogoj za preverjanje ali je gred dosegla končno točko vstavljanja z največjo napako enega milimetra
Uspesno = 1 'postavitev spremenljivke na 1, če je pogoj izpolnjen
Else
Uspesno =0 'postavitev spremenljivke na 0, če pogoj ni izpolnjen
Endif 'konec pogoja za preverjanje uspešnosti vstavljanja
Mvs Pvstavljanje + Pvrtenje, -20 'Pomik gredi iz kalibra po vertikalni smeri Z+
Dly 0.1
Pvisina3=P_Fbc 'Pridobitev vrednosti trenutne pozicije nahajanja gredi
If (Pvisina3.Z<250) Then Error 9100 'če se gred ni umaknila iz kalibra pojdi v napako: 'zataknitev gredi pri vstavljanju'
```

Slika 6.6: Del glavnega programa robotskega vstavljanja z uporabo vgrajene funkcije

V četrtem koraku sem s pravilno izdelanimi gredmi testiral delovanje izdelanega programa za avtomatsko vstavljanje. Hitrost robota sem pri testiranju nastavljal na 10 % vrednost maksimalne hitrosti. Postopek prvega kontakta (glej sliko 6.7) in poravnave zob (glej sliko 6.8) je v vseh primerih deloval. V večini primerov je problem nastal pri končnem potisku gredi do dna kalibra, kjer se je gred med potjo ustavila (glej sliko 6.9). Vzrok problema sem pripisal premajhni sili, povzročeni v vertikalni smeri Z. Kot že opisano, silo uravnavamo s parametri ukaza Cmpg, ki sem jih imel iz prvega koraka izdelave programa še vedno nastavljeni na vrednost 0.2.



Slika 6.7: Pozicija prvega kontakta gredi z kalibrom



Slika 6.8: Poravnava zob gredi z zobmi kalibra

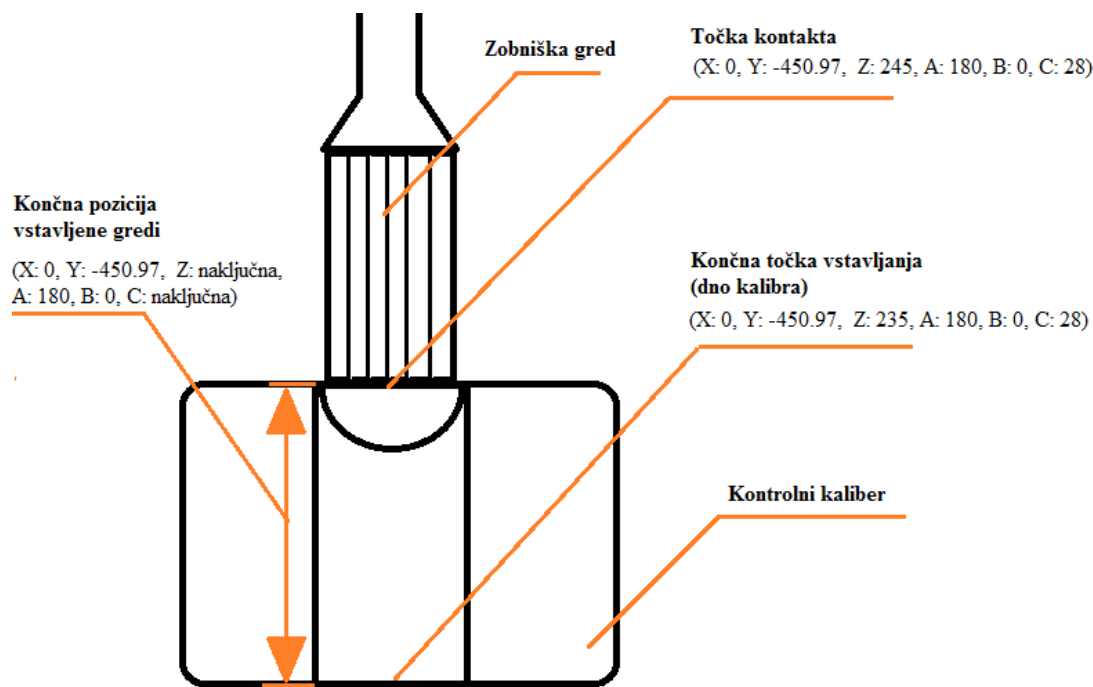


Slika 6.9: Neuspešno vstavljanje

V zadnjem koraku sem za končno delovanje robotskega vstavljanja glede na četrti korak potreboval pravilno nastavitev togosti robotske roke. Za pravilno nastavitev togosti robotske roke sem opravil serijo testiranj vstavljanj, v kateri sem pri vsakem vstavljanju spreminjal vrednosti parametrov ukaza Cmpg. V testiranju sem z uporabo ukaza P_fbc preverjal višino končnega potiska gredi. Za lažjo ugotovitev končnih nastavitev togosti sem moral vedeti vsaj približne vrednosti sil, delujočih v času kontakta. Kot omenjeno v podpoglavju 3.4.2, uporabljeni robot tako kot večina ne omogoča merjenja sil, delujočih na vrh robotske roke. Zato sem merjenje sil v vertikalni smeri opravil s senzorjem sile. Meritve in končne nastavitve togosti so opisane v naslednjem poglavju.

6.2.1 Nastavitev parametrov togosti vgrajene funkcije na podlagi opravljenih meritev sil in pozicij robotske roke

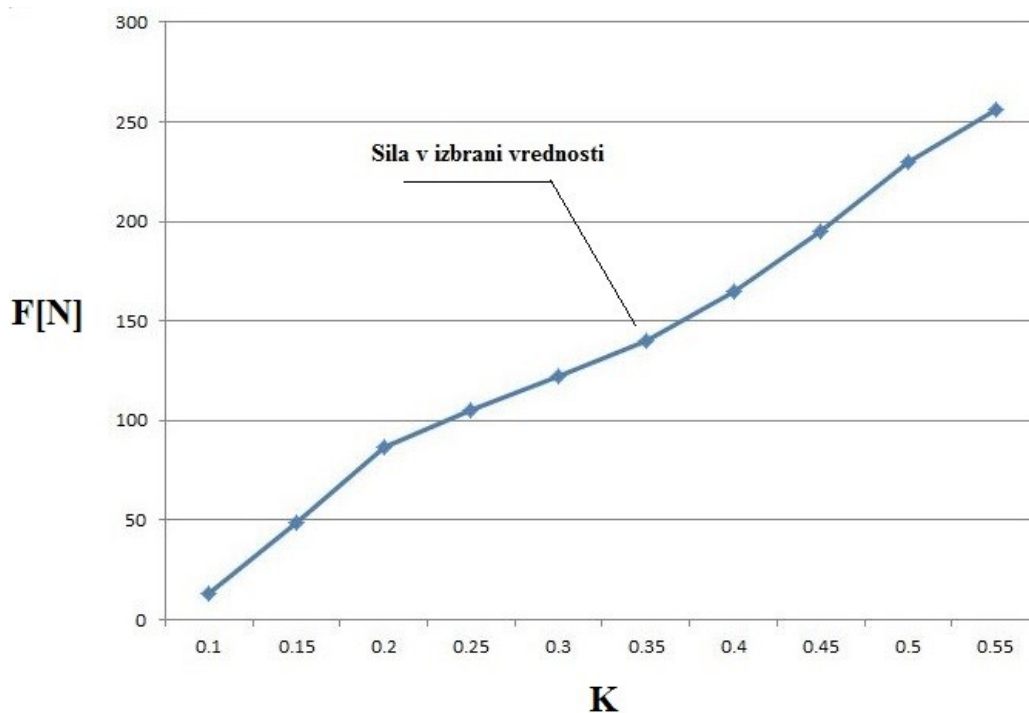
Meritve sil so bile opravljene v točki kontakta in končni poziciji gredi po vstavljanju. Tam so bile tudi odčitane vrednosti koordinate Z (globina vstavljene gredi). Pozicije odčitanih meritev prikazuje slika 6.10.



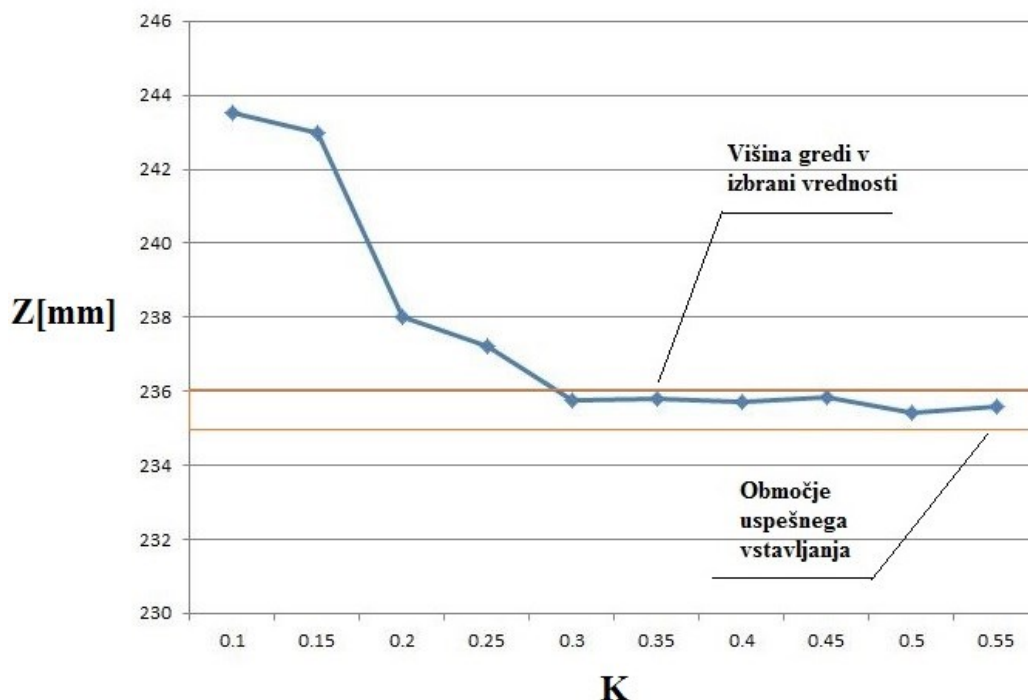
Slika 6.10: Prikaz pozicij gredi med vstavljanjem

Ob zagotovljenih enakih pogojih pri opravljanju meritev med vstavljanji nisem menjaval gredi. Opravil sem deset meritev, pri katerih sem vrednost parametra togosti v vertikalni smeri spreminjal v razponu 0.1 - 0.55 po koraku 0.05. Grafa na slikah 6.11 in 6.12 prikazujeta rezultate opravljenih meritev. S črko F so označene sile izražene v Njutnih, s črko K spremenjene vrednosti parametrov togosti in s črko Z vrednost istoimenske koordinate končne pozicije vstavljene gredi. Na prvem grafu lahko vidimo, kako se spreminjajo vrednosti sil ob kontaktu glede na spremembo parametrov togosti. Z večjimi vrednostmi parametra se večajo tudi sile, povzročene na gredi zaradi večje togosti robotske roke. Na drugem grafu lahko ob spremembi istih parametrov vidimo končne pozicije vstavljene gredi, ki so posledica sprememb

sil prikazanih, na prvem grafu. Na podlagi rezultatov sem tako ugotovil, da najboljšo končno pozicijo vstavljene gredi s čim manjšo silo zagotovim z nastavljeno vrednostjo parametra togosti na 0,35.



Slika 6.11: Prikaz vrednosti sil ob spremembi vrednosti parametra togosti robotske roke



Slika 6.12: Prikaz končne višine vstavljene gredi ob spremembi vrednosti parametra togosti robotske roke

6.3 Razvoj programa za vstavljanje z uporabo senzorja sile

Po razvoju programa za vstavljanje z vgrajeno funkcijo je sledil razvoj in testiranje programa z opremo za zagotavljanje programirane aktivne voljnosti robotske roke z uporabo senzorja sile. Pri opisu opreme v podpoglavju 4.5 so bile naštet različne programske funkcije integrirane v opremo za lažjo implementacijo aplikacij, pri katerih se uporablja senzor sile. Glede na to, da sem se pri razvoju prvega programa dobro spoznal z vzmetnim obnašanjem robotske roke, sem se pri uporabi senzorja sile odločil za uporabo integrirane funkcije »nadzor togosti«, ki prav tako povzroči vzmetno obnašanje robota. Pri razvoju programa sem tako tudi lahko uporabil prvi razviti program, pri katerem sem podprogram za vklop vgrajene funkcije zamenjal s podprogramom za vklop integrirane funkcije senzorja sile (glej sliko 6.13).

```

*voljnogibanje
'[Nastavitev kontrole senzorja]*****
P_FsStf0 = (+0.00,+0.00,+5.00,+0.00,+0.00,+0.10)(0,0) 'Koeficient trdote (ang. Stiffness coefficient) [N/mm]
P_FsDmp0 = (+0.00,+0.00,+0.00,+0.00,+0.00,+0.00)(0,0) 'Koeficient dušenja (ang. Damping coefficient)
P_FsMod0 = (+0.00,+0.00,+2.00,+0.00,+0.00,+2.00)(0,0) 'Izbira fukcije nadzora togosti v koordinatah Z in C
                                     '(ang. stiffness control)
M_FsCod0 = 1                                     'Izbira XYZ koordinatnega sistema
'[Nastavitev karakteristiki izbrane kontrole senzorja ]*****
P_FsGn0 = (+2.50,+2.50,+2.50,+1.00,+1.00,+2.50)(0,0) ' Nadzor ojačanja občutljivosti (ang. Force control gain) [μm/N]
Fsc On,0,0,1                                     ' Vklp funkcije nadzora togosti pri zgornje nastavljenih parametrih
return

```

Slika 6.13: Podprogram za vklop voljnega gibanja z uporabo integrirane funkcije senzorja sile

Po končani izdelavi drugega programa sem ponovno izvedel testiranje. Tudi pri senzorju sile se je v večini primerov pojavil problem pri končnem potisku gredi do dna kalibra. Tako sem moral tudi tukaj izvesti meritve sil in pozicije končnega vstavljanja, da sem dobil prave vrednosti parametrov.

6.3.1 Nastavitev parametrov senzorja sile na podlagi opravljenih meritev sil in pozicij robotske roke

Pri senzorju sile imamo na voljo veliko več parametrov za regulacijo sil kot pri vgrajeni funkciji robotske roke. Tako je bilo pri nadzoru togosti treba nastaviti vrednosti koeficienta trdote in ojačitve občutljivosti pri merjenju sil. Zaradi obsežnosti in podobnosti z že opisanimi meritvami bom navedel samo ugotovljene vrednosti: koeficient trdote je bil 5 N/mm, koeficient ojačitve občutljivosti pri merjenju sil pa 2.5 μm/N .

6.4 Delovanje uporabljenih rešitev

Po vsakem končanem razvoju programa za vstavljanje sem izvedel 20 poizkusov vstavljanj pravilno izdelanih gredi v prvi kaliber in 10 poizkusov slabo izdelanih gredi. Od slabo izdelanih gredi 7 zobniških gredi ni izpolnjevalo pogojev parametrov zobnikov za popolno prileganje, 3 gredi pa so vsebovale večje fizične poškodbe ozobij. Po vsakem poizkusu sem vpete gredi v robotsko prijemalo menjaval ročno. Vsi poizkusi vstavljanj pravilno izdelanih gredi s končnimi nastavitvami parametrov

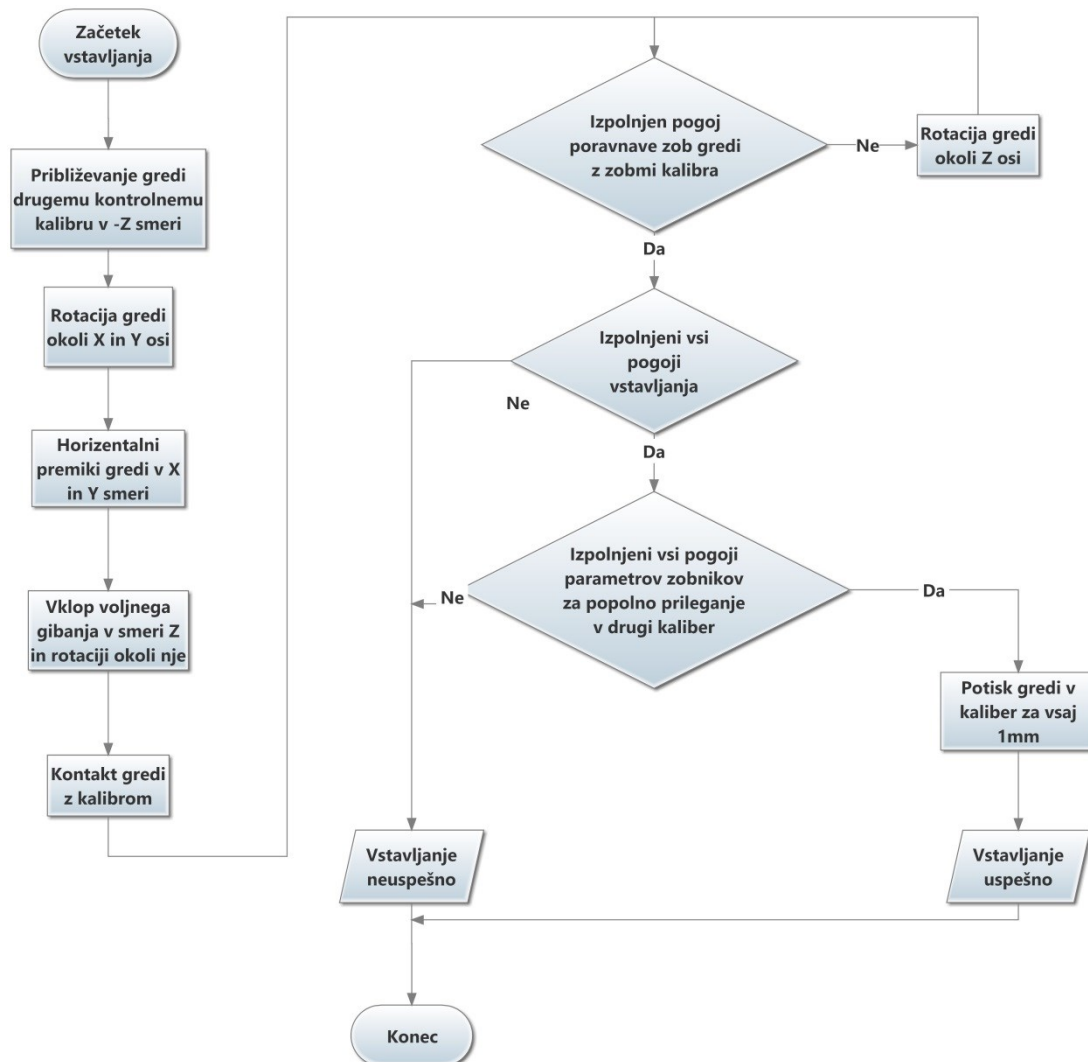
togosti robotske roke so bili opravljeni uspešno, kar prikazuje slika 6.14. Vsi poizkusi vstavljanj s slabo izdelanimi gredmi so bili neuspešni. Na podlagi opravljenih poizkusov sem ugotovil, da je robotsko vstavljanje obravnavanih zobniških gredi v prvi kontrolni kaliber popolnoma izvedljivo na oba načina.



Slika 6.14: Uspešno vstavljena pravilno izdelana gred

7 Končna kontrola zobniških gredi

Po uspešno zaključenem testiranju robotskega vstavljanja v prvi kontrolni kaliber je bilo na podjetju odločeno, da poizkusim še izvedbo kontrole pretankih gredi. Tako sem prvi kaliber zamenjal z drugim, namenjenim pregledovanju pretankih gredi, opisanem v poglavju 2. Postopek vstavljanja gredi je pri pretankih gredeh tak kot pri debelih gredeh z dvema razlikama. Prva razlika je, da je v kaliber mogoče vstaviti samo pretanko gred. Pri drugi razliki pa moramo upoštevati, da je preverjanje pretanke gredi lahko neuspešno tudi zaradi napak izpolnjevanja pogojev vstavljanja, kadar gred ni potisnjena do dna kalibra. Zato moramo pri drugem kalibru pogoj pravilne vstavitve določiti v točki tik pod kontaktom s kalibrom. Tako vsaka gred, ki je potisnjena v kaliber za več kot 1 mm, predstavlja pretanko izdelano gred. Slika 7.1 prikazuje spremenjeni postopek vstavljanja v drugi zobnik gredi glede na postopek vstavljanja v prvi kaliber, prikazan na diagramu poteka na sliki 6.2.



Slika 7.1: Diagram poteka spremenjenega postopka vstavljanja pretankih gredi glede na postopek vstavljanja predebelih gredi

7.1 prikazuje spremenjeni postopek vstavljanja v drugi zobnik gredi glede na postopek vstavljanja v prvi kaliber, prikazan na diagramu poteka na sliki 6.2. Glede na postopek, prikazan na sliki 7.1, je bilo ugotovljeno, da lahko uporabim programe za vstavljanje v prvi kaliber. Spremeniti sem moral le pogoj za uspešno vstavljanje ter interpretacijo podatka o uspešnem ali neuspešnem vstavljanju. Tako podatek o uspešno opravljenem vstavljanju v drugi kaliber pomeni, da so zobje na gredi pretanki. Podatek o neuspešnem vstavljanju v drugi kaliber pa pomeni, da zobje na gredi niso pretanki.

8 Zaključek

Pri ročnem vstavljanju imamo ljudje dovolj razvita čutila, s katerimi vidimo in čutimo, kako moramo pravilno vstaviti gred. Čeprav so industrijski roboti tehnološko precej napredovali, so pri njihovi uporabi za kompleksnejša vstavljanja še vedno določene omejitve, kot so zaznavanje sil in navorov ter ustrezno odločanje na podlagi pridobljenih informacij. Pri robotizaciji vstavljanja je treba upoštevati vse omenjene dejavnike. V diplomski nalogi je zajeta problematika vstavljanja čepa v luknjo, ki je posledica geometrijskih zamikov. Pri procesu vstavljanja gredi, ki je prav tako opisan v tem diplomskem delu, lahko zaradi neporavnosti zob pri vsakem vstavljanju pričakujemo geometrijski zamik gredi, kar lahko pripelje do trka gredi v kaliber. Z industrijskim robotom sem uporabil in preizkusil opisane rešitve montažnih procesov v procesu realizacije avtomatske kontrole.

Pri uporabi rešitve vgrajene aktivne voljnosti robota brez uporabe zunanjih senzorjev sil sem ugotovil, da čeprav informacije o silah in navorih pridobivamo posredno preko servomotorjev robotske roke, lahko z uporabo naprednih regulacij pri vstavljanju gredi dovolj natančno omejimo delovanje prekomernih sil robotske roke. Pri merjenju sil sem uporabil senzor sile, ki je bil namenjen testiranju naslednje rešitve, saj drugače nisem mogel dobiti ustreznih informacij o silah, delujočih ob kontaktu. Informacije sem potreboval za ugotavljanje, ali so vrednosti sile, delujoče v vertikalni smeri, v mejah trdnosti gredi. Največji problem uporabljene rešitve je zame predstavljalo zamudno nastavljanje parametrov togosti vgrajene funkcije.

Po realizaciji vstavljanja z rešitvijo aktivne voljnosti robota z uporabo zunanjih senzorjev sil sem ugotovil, da je rešitev za kompleksne montažne procese ustrežnejša od prejšnje. Trditev dokazuje že osnovna lastnost senzorja sile, in sicer, da nam direktno preko ustreznega krmilnika vrača točne vrednosti sil na vrhu robotske roke v šestih prostorskih stopnjah. Pri uporabi opreme proizvajalca Mitsubishi electric sem glede na veliko število vgrajenih funkcij ugotovil, da bi lahko realiziral postopek vstavljanja tudi na druge načine (opisani so v poglavju 4.5), in ne le s funkcijo togosti. Kot pri prejšnji rešitvi je bilo tudi v tej funkciji nastavljanje parametrov zamudno.

Na podlagi testiranja sem ugotovil, da je realizacija kontrole kakovosti zobnikov možna z obema rešitvama. Vendar moramo za zagotavljanje pravilne kontrole vedno izpolniti vse pogoje vstavljanja (opisani so v podpoglavju 2.3), saj pravilne parametre zobnikov gredi (opisani so v podpoglavju 2.2) ugotavljamo na podlagi uspešnega oziroma neuspešnega vstavljanja gredi v oba kontrolna kalibra.

9 Literatura

- [1] Jože Flašker, Srečko Glodež, Zoran Ren, *Zobniška gonila*, Založba Pasadena, Ljubljana 2010.
- [2] T. Bajd, *Robotika*, Založba FE in FRI, Ljubljana 2002.
- [3] Mitsubishi electric, *F-Series catalogue*, Document ID: L(NA)-09067ENG-C, Japan, July 2013.
- [4] D.E. Whitney, Quasi-Static assembly of Compliantly Supported Rigid Parts, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol.104, str. 65-77, March 1982.
- [5] H. Chen, J. Wang, G. Zhang, T. Fuhlbrigge, S. Kock, High-precision assembly automation based on robot compliance, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 45, št. 9-10 , str. 999-1006, December 2009.
- [6] Mitsubishi electric, RV-4F-Q/7F-Q Series Standard Specifications Manual (CR750-Q Controller), Document ID: BFP-A8933-D, Januar 2013.
- [7] Mitsubishi electric, CR750-Q/CR751-Q Controller Instruction Manual, setup, basic operation, and maintenance, Document ID: BFP-A8886-F, Januar 2013.

[8] Mitsubishi electric, RV-4F/7F Series Instruction Manual, Robot arm setup & Maintenance, Document ID: BFP-A8935-C, Januar 2013.

[9] Mitsubishi electric, CR750/CR751Series Controller Instruction Manual, Detailed explanations of functions and operations, Document ID: BFP-A8869-E, Januar 2013.

[10] Mitsubishi electric , CR750/CR751 Controller Instruction Manual, Force Sense Function, Document ID: BFP-A8947, October 2012.

[11] K. Murata, Force Sense Control System for Industrial Robots, Mitsubishi Electric ADVANCE, June 2013.