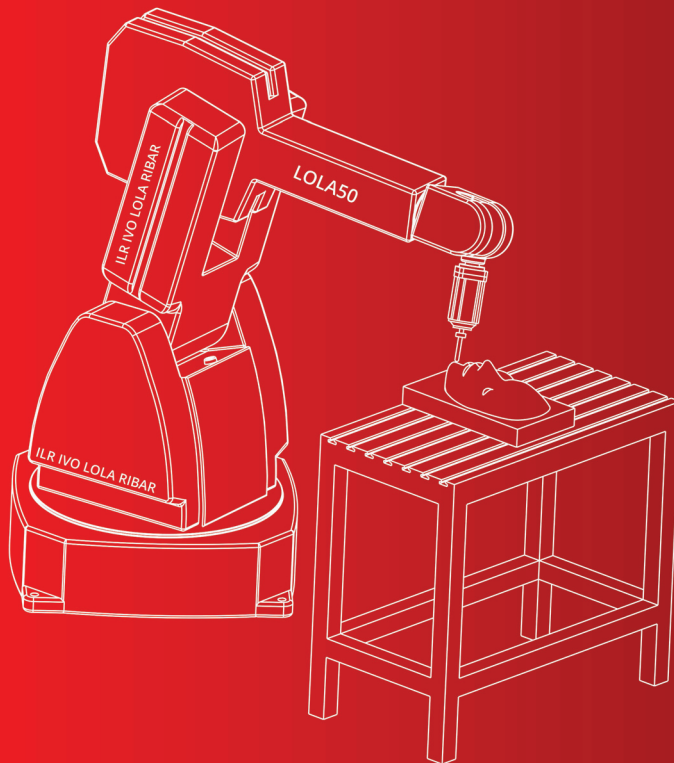


Универзитет у Београду
Машински факултет

Никола СЛАВКОВИЋ Зоран ДИМИЋ

РАЗВОЈ РЕКОНФИГУРАБИЛНОГ ОБРАДНОГ СИСТЕМА НА БАЗИ РОБОТА



Београд, 2020

Универзитет у Београду
Машински факултет

Никола Славковић
Зоран Димић

**РАЗВОЈ РЕКОНФИГУРАБИЛНОГ
ОБРАДНОГ СИСТЕМА
НА БАЗИ РОБОТА**

Београд, 2020

Др Никола Славковић, доцент
Др Зоран Димић, научни сарадник

РАЗВОЈ РЕКОНФИГУРАБИЛНОГ ОБРАДНОГ СИСТЕМА НА БАЗИ РОБОТА

Рецензенти:

Проф. др Драган Милутиновић, Универзитет у Београду, Машински факултет
Проф. др Милан Зељковић, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука
Проф. др Слободан Табаковић, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука

Издавач:

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
11120 Београд, Краљице Марије 16

За издавача:

Декан, проф. др Радивоје Митровић

Главни и одговорни уредник:

Проф. др Милан Лечић

Одобрено за штампу одлуком Декана Машинског факултета
у Београду бр. 09/2020 од 02.07.2020. године

Тираж: 100 примерака

ISBN 978-86-6060-044-0

Штампа:

Planeta print
11000 Београд, Игора Васиљева 33г

Предговор

Примена робота у области обраде резањем се, до скоро, углавном односила на бушење, помоћне операције обраде (чишћење, обарање ивица брушењем или глодањем), полирање, итд. У последње две деценије се интензивно ради на истраживању и развоју робота за вишесну обраду глодањем првенствено сложенијих делова, већих димензија од мекших материјала и ниже класе тачности. Примена индустријских робота, с обзиром на њихову цену, флексибилност и величину радног простора, за ову класу задатака је данас увелико препозната као алтернатива релативно скупим 5-осним машинама алаткама.

Ова монографија представља резултате вишегодишњег истраживања у области развоја реконфигурабилних обрадних система на бази робота. Развијени обрадни систем је базиран на 6-осном роботу вертикалне зглобне конфигурације домаће производње *ЛОЛА50*. Развој система је обухватио две групе проблема. Први, развој реконфигурабилног система управљања отворене архитектуре са програмирањем у *G*-коду и други, побољшање тачности обраде кроз развој *off-line* метода компензације грешака насталих под дејством сила резања услед статичке попустљивости робота.

Истраживања су спроведена кроз учешће аутора у реализацији више пројеката технолошког развоја које подржава Министарство просвете, науке и технолошког развоја. Експерименти, који су приказани у монографији, изведени су у лабораторијама Катедре за производно машинство, Машинског факултета Универзитета у Београду и у Лабораторији за машине алатке и роботе Лола института.

Посебну захвалност изражавамо ментору проф. др Драгану Милутиновићу за савете, подстрек и усмеравање у току истраживања чији су резултати приказани у овој монографији.

Такође, желимо да се захвалимо и рецензентима на корисним примедбама и сугестијама.

За велико интересовање и подршку у нашем раду захвалност дугујемо и проф. др Милошу Главоњићу, проф. др Сашу Живановићу и доц. др Бранку Кокотовићу.

У Београду, фебруар 2020.

Аутори
Никола Славковић
Зоран Димић

Списак акронима

ADEOS	Adaptive Domain Environment for Operating Systems
APPVA	Алгоритам за Предикцију Помераја Врха Алата
AMPLS	Алгоритам за Модификацију Програмираног Линеарног Сегмента
APT	Automatically Programmed Tool
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CLF	Cutter Location File
CNC	Computer Numerical Control
CMM	Coordinate measuring machine
D-H	Денавит-Хартенберг
GUI	Graphical User Interface
HAL	Hardware Abstraction Layer
OAC	Open Architecture Control
OpenGL	Open Graphics Library
PC	Personal computer
STEP-NC	Standard for Product Model Data Exchange for Numerical Control
UML	Unified Modeling Language
VIR	Виртуелни индустријски робот
XML	Extensible Markup Language

Садржај:

1	УВОД.....	1
2	ОБРАДНИ СИСТЕМИ НА БАЗИ РОБОТА	5
2.1	Управљање и програмирање робота за вишеосну обраду	5
2.2	Компензација грешака услед попустљивости робота	7
2.3	Конфигурисање елементарних ћелија за обраду на бази робота	14
2.4	Опис развијеног експерименталног система за вишеосну обраду на бази робота	18
3	КИНЕМАТИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ РОБОТА ЗА ОБРАДУ.....	21
3.1	Кинематичко моделирање робота као вертикалне 5-осне машине алатке	22
3.1.1	<i>Унутрашње и спољашње координате вертикалне глодалице</i>	<i>23</i>
3.1.2	<i>Директни и инверзни кинематички проблем вертикалне глодалице</i>	<i>25</i>
3.1.3	<i>Јакобијан матрица вертикалне глодалице.....</i>	<i>32</i>
3.1.4	<i>Анализа радног простора вертикалне глодалице.....</i>	<i>33</i>
3.2	Кинематичко моделирање робота као хоризонталне 5-осне машине алатке	35
3.2.1	<i>Унутрашње и спољашње координате хоризонталне глодалице</i>	<i>35</i>
3.2.2	<i>Директни и инверзни кинематички проблем хоризонталне глодалице</i>	<i>37</i>
3.2.3	<i>Анализа радног простора хоризонталне глодалице.....</i>	<i>44</i>

4	СИСТЕМ УПРАВЉАЊА ОТВОРЕНЕ АРХИТЕКТУРЕ СА ПРОГРАМИРАЊЕМ У G-КОДУ	45
4.1	Осврт на актуелне управљачке системе робота са освртом на примену у обради.....	46
4.2	Традиционалне методе програмирања робота за обраду	47
4.2.1	<i>On-line</i> методе програмирања	47
4.2.2	<i>Off-line</i> методе програмирања.....	48
4.2.3	<i>Опште карактеристике традиционалних метода програмирања робота за обраду</i>	50
4.3	Развој управљачког система робота за обраду.....	51
4.3.1	<i>Linux</i> као основа <i>real-time</i> управљачког система.....	52
4.3.2	<i>Структура софтвера LinuxCNC</i>	54
4.3.3	<i>Развој софтвера и конфигурисање хардвера управљачког система на бази LinuxCNC-а за управљање робота за обраду</i>	58
4.3.4	<i>Реконфигурабилност управљачког система робота за обраду</i>	65
4.4	Експериментална верификација развијеног управљачког система робота за обраду.....	70
5	ВИРТУЕЛНИ МОДЕЛИ РОБОТА ЗА ОБРАДУ	83
5.1	Конфигурисање виртуелних робота за обраду.....	85
5.1.1	<i>Конфигурисање виртуелних робота за обраду у PTC Creo окружењу</i>	86
5.1.2	<i>Конфигурисање виртуелних робота за обраду у STEP-NC Machine окружењу</i>	87
5.2	Конфигурисање виртуелног робота као интегралног дела управљачког система.....	92
6	ИДЕНТИФИКАЦИЈА И АНАЛИЗА СТАТИЧКЕ ПОПУСТЉИВОСТИ РОБОТА.....	97
6.1	Моделирање матрице попустљивости индустријских робота....	98
6.2	Идентификација статичке попустљивости робота	100
6.3	Експериментално аналитичка идентификација попустљивости зглобова.....	103

6.3.1	Мерење помераја врха робота.....	103
6.3.2	Израчунавање директних и индиректних попустљивости робота у Декартовом простору.....	107
6.3.3	Формирање система једначина	108
6.3.4	Израчунавање попустљивости зглобова.....	109
6.4	Верификација идентификованих попустљивости зглобова.....	111
6.5	Анализа утицаја попустљивости врха робота	114
7	МЕТОД OFF-LINE КОМПЕНЗАЦИЈЕ СТАТИЧКИХ ГРЕШАКА ИЗАЗВАНИХ СИЛАМА РЕЗАЊА	119
7.1	Концепт метода компензације грешака	119
7.2	Механистички модел сила резања.....	121
7.3	Израчунавање помераја врха алата при обради роботом.....	123
7.4	Опис метода компензације грешака.....	125
7.4.1	Модификација положаја тачке на програмираној путањи алата	127
7.4.2	Модификација програмираног линеарног сегмента	128
7.5	Експериментална верификација метода компензације	133
7.6	Симулација кориговане путање алата на виртуелном моделу робота за обраду.....	141
8	ПРИМЕНА СТАНДАРДА STEP-NC У ПРОГРАМИРАЊУ И СИМУЛАЦИЈИ ОБРАДЕ РОБОТИМА.....	147
8.1	Могућности програмирања робота за вишеосну обраду.....	148
8.2	Методологија за програмирање робота на бази STEP-NC протокола	151
8.3	Превођење P21 датотеке у програмски језик за роботе	156
8.4	Верификација методологије програмирања на бази STEP-NC протокола.....	161
9	ЗАКЉУЧАК.....	165
	ЛИТЕРАТУРА.....	167

1 Увод

Перманентна истраживања у области технологија вишеосне обраде су наметнута све бржим развојем нових производа у многим гранама индустрије. Нови производи, првенствено у авио и аутомобилској индустрији, пред произвођаче обрадних система постављају захтеве који се, поред високе тачности и квалитета обраде, односе и на све сложенију геометрију делова. На поменуте захтеве произвођачи обрадних система одговарају сталним развојем и усавршавањем 5-осних машина алатки, као и мултифункционалних и реконфигурабилних обрадних система. Савремене 5-осне машине алатке су пројектоване за делове са високим функционалним захтевима, сложене геометрије и високе класе тачности и квалитета обраде. Мултифункционални и реконфигурабилни обрадни системи, базирани на 5-осним машинама алаткама, одликују се великим бројем управљаних оса, што омогућава да се делови сложене геометрије обраде на једној машини и у што мањем броју базирања применом различитих метода обраде резањем [1–3]. Савремене 5-осне машине алатке одликује висок ниво управљања и програмирања на бази *CAD/CAM* система, висока тачност али и веома висока цена и релативно мали радни простор.

Примена робота у индустрији, која је започела 60-тих година прошлог века, има за циљ повећање продуктивности, подизање и одржавање константног нивоа квалитета производа, подизање флексибилности производне опреме и хуманизацију рада. Данас је њихова примена у индустрији велика од извршавања задатака манипулације и опслуживања машина, преко обављања различитих процеса укључујући и монтажу, до извршавања специјалних задатака као што су мерење, контрола, итд. Индустријски роботи су по дефиницији мултифункционалне машине чија традиционална примена у области обраде резањем се углавном односи на бушење, помоћне операције обраде (чишћење, обарање ивица брушењем или глодањем), полирање, итд. Према *IFR (International Federation of Robotics)*, у 2016. години само 1,4% индустријских робота се користило у задацима обраде резањем [4].

У последње две деценије се интензивно ради на истраживању и развоју обрадних система на бази робота за примену у задацима вишеосне обраде глодањем [4–12]. Истраживања се првенствено односе на обраду глодањем

На крутост, односно попустљивост индустријских робота утичу попустљивост зглобова, геометрија и материјал сегмената структуре и базе робота, попустљивост преносника и активна попустљивост коју обезбеђује контролер робота [9]. Како је крутост сегмената данашњих робота довољно велика, за главне изворе попустљивости робота се сматрају елементи конструкције зглоба, преносници и актуатори са својим серво управљањем, чији се збирни утицај назива резултујућом крутошћу зглоба. Као што је наведено у [18, 19], при извршавању задатака у којима су силе и моменти који делују на енд-ефектор занемарљиви, највећи утицај на тачност остварене позиције робота имају геометријске грешке, које настају као последица разлике између номиналних и стварних вредности параметара робота, за чију идентификацију постоје различите калибрационе процедуре [16]. Међутим, при извршавању неких технолошких задатака, силе и моменти који делују на енд-ефектор могу изазвати значајне деформације компонената робота, услед његове статичке и динамичке попустљивости [20].

На пример, силе и моменти резања, који су по правилу динамички, изазивају значајне деформације при обради делова роботом, што веома утиче на тачност обраде. С обзиром да је крутост серијске структуре робота неколико десетина пута мања од крутости *CNC* машина алатки [8] и како су силе резања реда величине неколико стотина N то грешке изазване силама резања, услед попустљивости робота, лако прелазе вредност од $1mm$ [11]. На величину ових грешака утиче попустљивост робота и величина сила резања. У циљу решавања проблема недовољне крутости робота, поред анализе попустљивости робота у радном простору и избора режима обраде, чиме се може утицати на величину сила резања, данас се развијају и различити *off-line* и *on-line* алгоритми компензације ових грешака [6, 8, 10, 16, 21].

Истраживања у области примене робота у задацима вишеосне обраде глодањем, кроз развој експерименталног реконфигурабилног обрадног система на бази 6-осног робота вертикалне зглобне конфигурације, која су приказана у овој монографији, базирала су се првенствено на решавање проблема сложености програмирања и недовољне крутости робота и обухватила су:

- Развој метода кинематичког моделирања елементарних обрадних ћелија на бази робота којима се, блокирањем одговарајућих зглобова робота, емулирају вертикалне и хоризонталне 5-осне машине алатке различитих конфигурација, чиме се обезбеђује реконфигурабилност развијеног система;
- Развој система управљања отворене архитектуре базираног на *PC real-time Linux* платформи и *LinuxCNC* софтверском систему (ранији назив овог софтвера је био *EMC2 - Enhanced Machine Controller*) са програмирањем у *G*-коду, што је омогућило употребу

конвенционалних *CAD/CAM* система који се користе за програмирање 5-осних машина алатки у задацима вишеосне обраде;

- Развој виртуелних модела робота, као интегралног дела управљачког система, у објектно-оријентисаном програмском језику *Python* уз коришћење *OpenGL-a (Open Graphics Library)*, који се користе за симулацију и верификацију програма у циљу избегавања сингуларних конфигурација и ограничења у зглобовима робота;
- Развој приступа за моделирање статичке попустљивости робота, који даје увид у утицај попустљивости сваког зглоба на попустљивост врха робота у Декартовом простору (простору спољашњих координата). Овај приступ може бити користан за произвођаче робота у фази пројектовања, односно испитивања прототипских верзија робота, како би се постигла жељена крутост, односно попустљивост зглобова робота;
- Развој метода *off-line* компензације грешака обраде насталих услед статичке попустљивости робота под дејством сила резања, у циљу побољшања тачности обраде. Развијени метод компензације грешака обраде се врши модификацијом програмиране путање, односно корекцијом *G*-кода, на основу предикованих помераја врха алата, насталих услед дејства сила резања, применом развијеног алгоритма за модификацију програмираног линеарног сегмента путање;
- Развој приступа за примену *STEP-NC (Standard for Product Model Data Exchange for Numerical Control)* стандарда, као новог метода за програмирање нумерички управљаних машина алатки, али и за програмирање обрадних система на бази робота.

2 Обрадни системи на бази робота

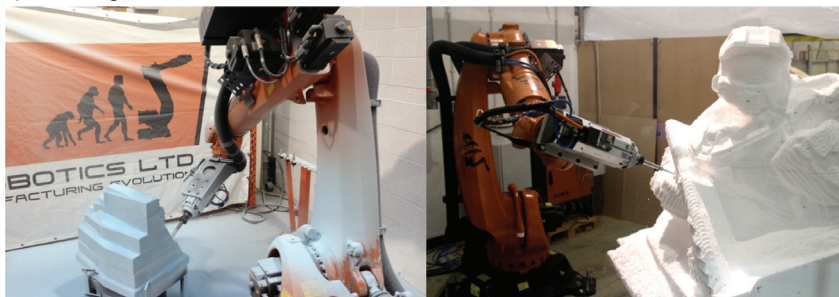
Развој индустријских робота је највећим делом диктиран потребама аутомобилске и авио индустрије. Управљачки системи робота и њихови програмски језици покривају врло различите области примене робота, као што су манипулација, заваривање, бојење, и тзв. помоћне операције обраде (нпр. обарање ивица, чишћење, полирање и слично). Стални технолошки напредак у области развоја робота, у погледу флексибилности, носивости, тачности и динамике, доводи до континуираног проширења примене индустријских робота. Индустријски роботи су, кроз низ покренутих пројеката [4–9, 16], препознати као алтернатива 5-осним машинама алаткама за вишеосну обраду глодањем сложенијих делова, већих димензија од мекших материјала и ниже класе тачности, с обзиром на њихову флексибилност, цену и величину радног простора. Поред Декартове конфигурације, која се по својој структури може сматрати 5-осном порталном (*Gantry*) глодалицом, индустријски роботи вертикалне зглобне, односно антропоморфне конфигурације, су данас најзаступљенији у обради резањем. Истраживања у области примене робота у вишеосној обради [4–9, 16], која су покренута од стране истраживача и произвођача робота и *CAD/CAM* софтвера, се првенствено односе на решавање проблема недовољне крутости структуре робота и сложености програмирања робота за задатке вишеосне обраде.

2.1 Управљање и програмирање робота за вишеосну обраду

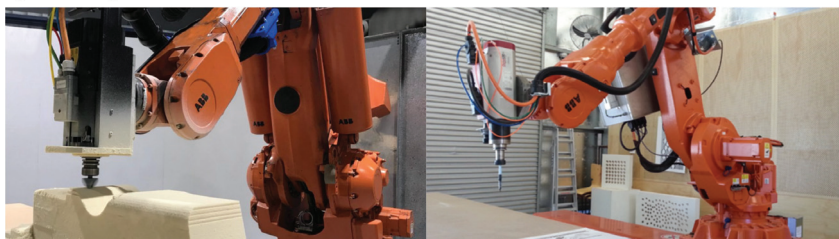
Поред тога што неки реномирани произвођачи пројектују роботе за задатке вишеосне обраде сложених делова, слика 2.1а, за ове задатке се користе и постојећи роботи вертикалне зглобне конфигурација, слике 2.1б до 2.1г, са или без додатне мобилне осе, опремљени моторним вretenом. Међутим, њихово програмирање у задацима вишеосне обраде, постојећим програмским језицима за роботе, је веома сложено и дуготрајно. Као што је речено, програмски језици за роботе се значајно разликују по структури и могућностима, услед различитих основа на којима су језици развијани али и чињенице да су ове језике развијале познате истраживачке лабораторије, *IT (Information Technology)* компаније и наравно произвођачи робота [5]. Разноликост и сложеност програмирања робота се негативно одразила на њихову примену у обради.



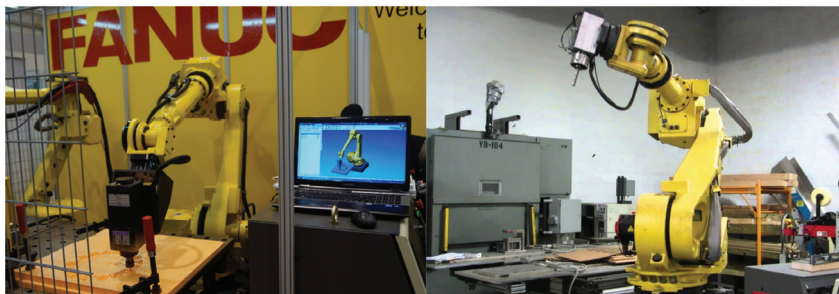
а) *Staubli* роботи



б) *KUKA* роботи



в) *ABB* роботи



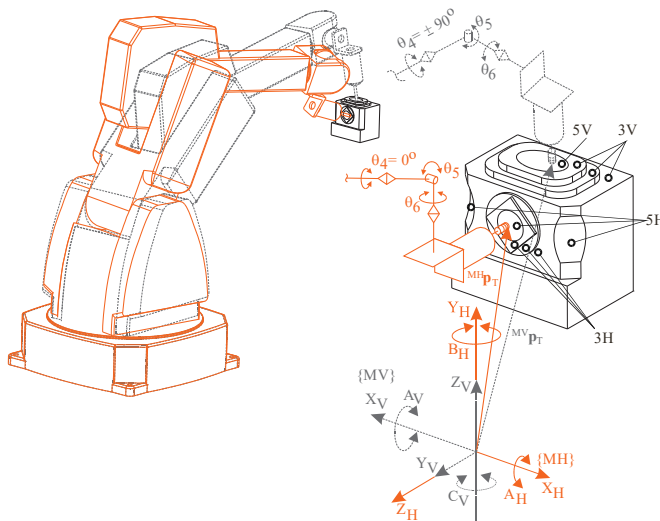
г) *Fanuc* роботи

Слика 2.1 Примери робота за обраду различитих произвођача [22–25]

Реализација једног реконфигурабилног обрадног система на бази робота подразумева:

- прво, развој приступа кинематичког моделирања који треба да омогући реконфигурисање 6-осног робота, односно емулирање различитих хоризонталних и вертикалних 5-осних машина алатки,
- а потом и развој система управљања и програмирања који би омогућио реконфигурабилност обрадног система, чак и у току једног задатка.

Приказани реконфигурабилни обрадни систем, поред избегавања сингуларитета и ограничења кретања у зглобовима робота, који се могу јавити током обраде, омогућава и реконфигурисање робота и у току једног задатка, када се захтева вишестрана обрада врло сложених делова у једном базирању (*multifaceted machining*). Као пример, на слици 2.10 је показан радни предмет код кога је потребно површине са горње стране обрадити програмима за 5-осну вертикалну глодалицу типа $(X_V, Y_V, Z_V, A_V, C_V)$, а сложене површине на бочним странама обрадити програмима за 5-осну хоризонталну глодалицу типа $(X_H, Y_H, Z_H, A_H, B_H)$.



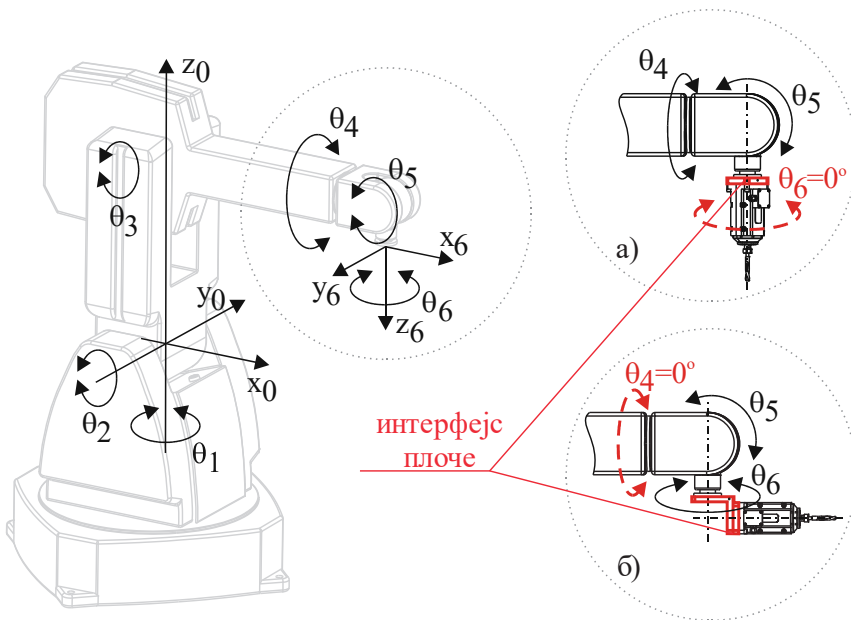
Слика 2.10 Емулирање хоризонталне и вертикалне 5-осне машине алатке за обраду дела сложене геометрије у једном базирању

2.4 Опис развијеног експерименталног система за вишеосну обраду на бази робота

За истраживања приказана у овој монографији, а која су се односила на развој реконфигурабилног система за вишеосну обраду на бази робота, коришћен је расположиви 6-осни робот *ЛОЛА50*, вертикалне зглобне конфигурације, домаће производње и носивости *50kg*, слика 2.11. Блокирањем

3 Кинематичко моделирање робота за обраду

За емулирање стандардизованих и специјализованих 5-осних робота, односно 5-осних машина алатки, користе се 6-осни роботи вертикалне зглобне конфигурације, слика 2.9. На сликама 3.1а и 3.1б су приказане могућности емулирања, блокирањем одговарајуће осе робота, два типа 5-осних робота стандардизованим 6-осним роботом *ЛОЛА50* вертикалне зглобне конфигурације, слика 2.11.

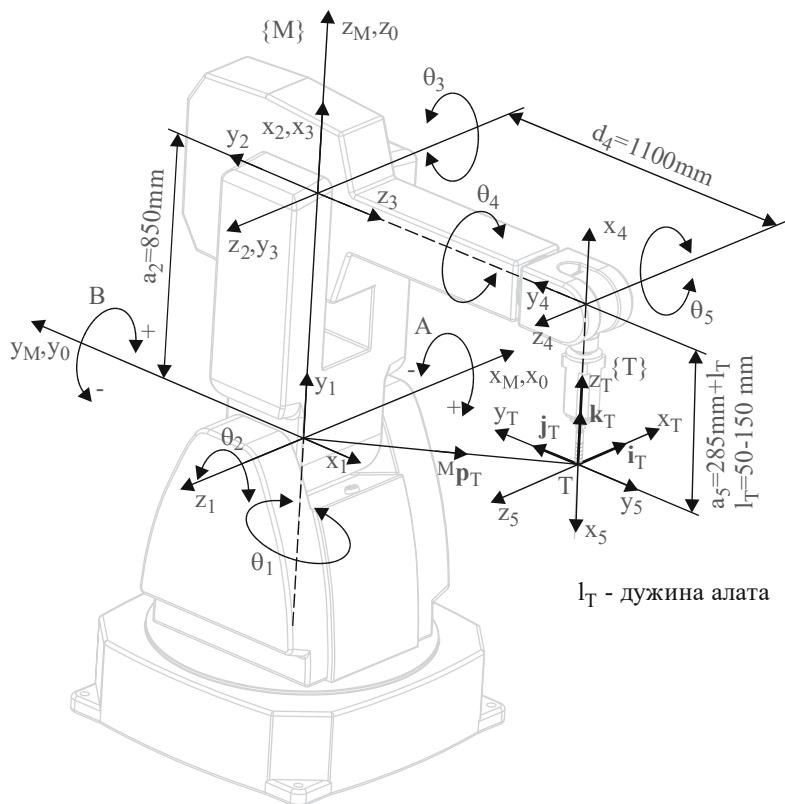


Слика 3.1 Петоосни роботи емулирани из шестоосног робота вертикалне зглобне конфигурације уз употребу одговарајућих интерфејс плоча

Петоосни робот са слике 3.1а, блокирана шеста оса $\theta_6 = 0^\circ$, представља емулирани специјализовани робот за обраду, слика 3.2а. Петоосни робот са

Заменом $D-H$ параметара из табеле 3.1 у једначину (3.12) формирају се матрице трансформације ${}^i-1A$, $i = 1, 2, \dots, 5$ на следећи начин

$$\begin{aligned}
 {}^0_1A &= \begin{bmatrix} s\theta_1 & 0 & -c\theta_1 & 0 \\ -c\theta_1 & 0 & -s\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^1_2A &= \begin{bmatrix} -s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & -a_2 \cdot s\theta_2 \\ c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & a_2 \cdot c\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^2_3A &= \begin{bmatrix} c\theta_3 & 0 & s\theta_3 & 0 \\ s\theta_3 & 0 & -c\theta_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^3_4A &= \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & s\theta_4 & 0 \\ -s\theta_4 & 0 & c\theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^4_5A &= \begin{bmatrix} -c\theta_5 & s\theta_5 & 0 & -a_5 \cdot c\theta_5 \\ -s\theta_5 & -c\theta_5 & 0 & -a_5 \cdot s\theta_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & & (3.13)
 \end{aligned}$$



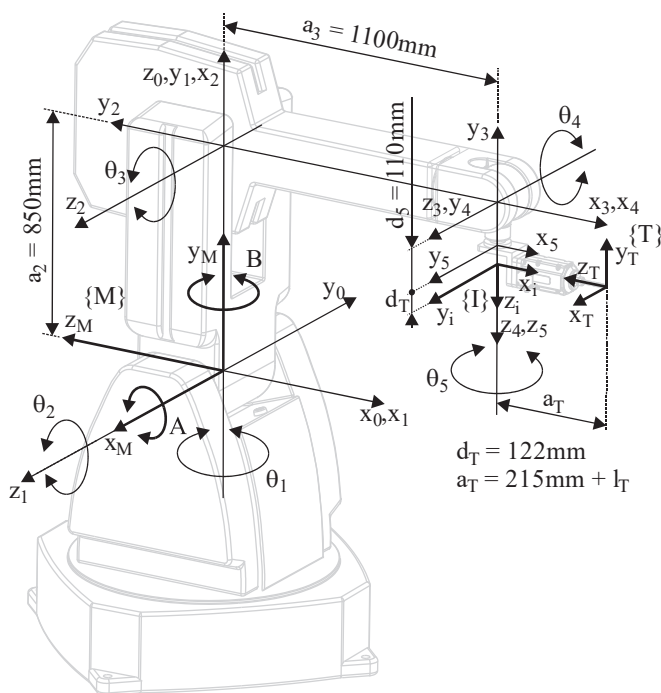
Слика 3.5 $D-H$ координатни системи робота у референтном положају за случај када се емулира 5-осна вертикална глодалница

$$x = [x_M \quad y_M \quad z_M \quad A \quad B]^T \quad (3.42)$$

3.2.2 Директни и инверзни кинематички проблем хоризонталне глодалице

На слици 3.10 су приказани $D-H$ координатни системи робота у референтном положају, за случај када се роботом емулира 5-осна хоризонтална глодалица конфигурације (X,Y,Z,A,B) . Ограничења кретања зглобова робота су специфицирана у односу на усвојени референтни положај робота и представљају мање опсеге кретања него што су стварни опсези кретања робота. Усвојена ограничења кретања оса зглобова робота, као и у претходном случају, обезбеђују:

- погодности везане за крутост робота,
- узимање у обзир само једног решења инверзне кинематике и
- избегавање сингуларитета унутар усвојеног радног простора.



Слика 3.10 $D-H$ координатни системи робота за обраду у референтном положају

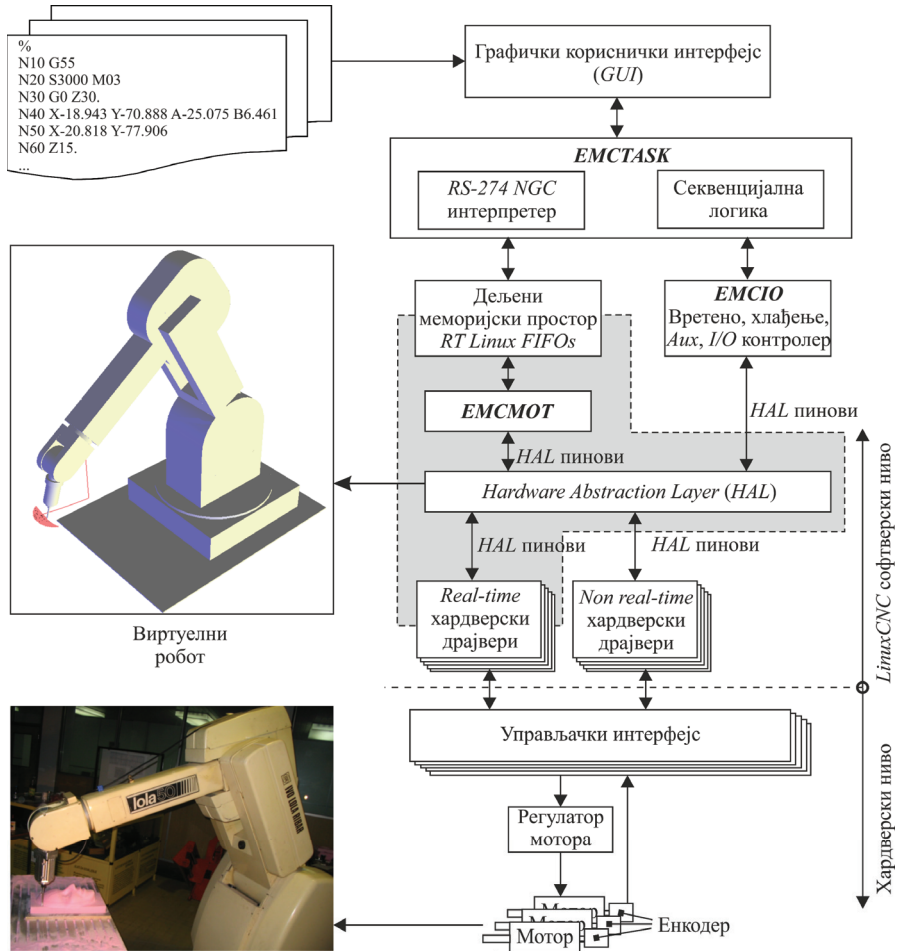
4 Систем управљања отворене архитектуре са програмирањем у G-коду

Као што је речено, један од највећих недостатака данашњих индустријских робота у погледу примене у задацима вишеосне обраде је њихово програмирање. Другим речима, њихово програмирање, програмским језицима за роботе, за примену у брзој изради прототипова или у вишеосној обради је веома сложено и дуготрајно. Присуство различитих програмских језика за програмирање робота, не олакшава, већ додатно отежава примену робота у апликацијама обраде. Релативно мало тржиште, али и неспремност произвођача робота да открију детаље својих управљачких алгоритама и софтвера, резултирало је изостанком одговарајућих стандарда у области роботике, који би дали јединствену основу за развој система за програмирање робота.

У области производног машинства је за програмирање машина алатки широко прихваћен стандард *RS274*, који је установљен давне 1950. године. *G*-код, који је дефинисан датим стандардом, широко је прихваћен од стране произвођача *CNC* машина алатки. У оквиру истраживања приказаних у овој монографији, спроведених у циљу проналажења једноставнијег начина програмирања робота за обраду, развијен је управљачки систем, који треба да омогући да се постојећи *CAD/CAM* системи, посредством *G*-кода, користе за програмирање робота. Сама чињеница да ће се за програмирање робота за обраду примењивати стандарди, алати и технике за програмирање машина алатки, наводи на приступ развоју управљачког система робота који ће му дати могућност емулације хоризонталних и вертикалних 5-осних машина алатки.

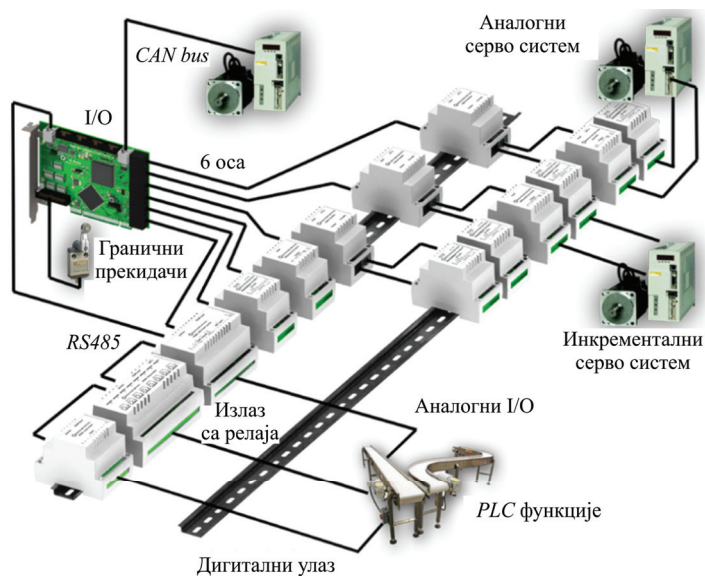
Шестоосни робот вертикалне зглобне конфигурације без додатних оса, који у различитим кинематичким конфигурацијама треба да емулира рад различитих машина алатки, се може сматрати елементарном реконфигурабилном роботском ћелијом за обраду, слике 2.9 и 2.12. Структура реконфигурабилне роботске ћелије за обраду, уз машине које емулира, представља смерницу развоју софтверских и хардверских модула управљачког система, који и сам мора имати особину реконфигурабилности. Могућности прилагођавања кориснику, скалабилности, модуларности и адаптивности морају бити карактеристике система управљања и програмирања

контролер процеса интерпретира и у одговарајућим временским тренуцима прослеђује контролеру кретања или улазно/излазном контролеру дискретних сигнала. Као што се са слике 4.3 може видети, комуникација између *real-time EMC MOT* модула и *non-real-time* модула *EMCTASK* се обавља преко дељеног меморијског бафера посредством *RTLinux FIFO* механизма.



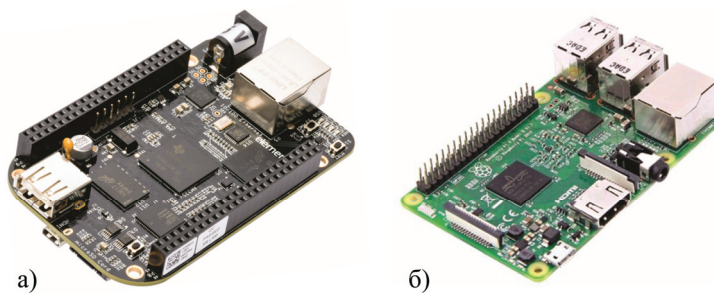
Слика 4.3 Архитектура LinuxCNC-a

GUI спада у екстерне програмске модуле и представља графички кориснички интерфејс за преузимање и покретање програма обраде, покретање иницијализације као и праћење рада машине, овде робота за обраду, посредством графичког приказа путање алата и/или виртуелног роботског



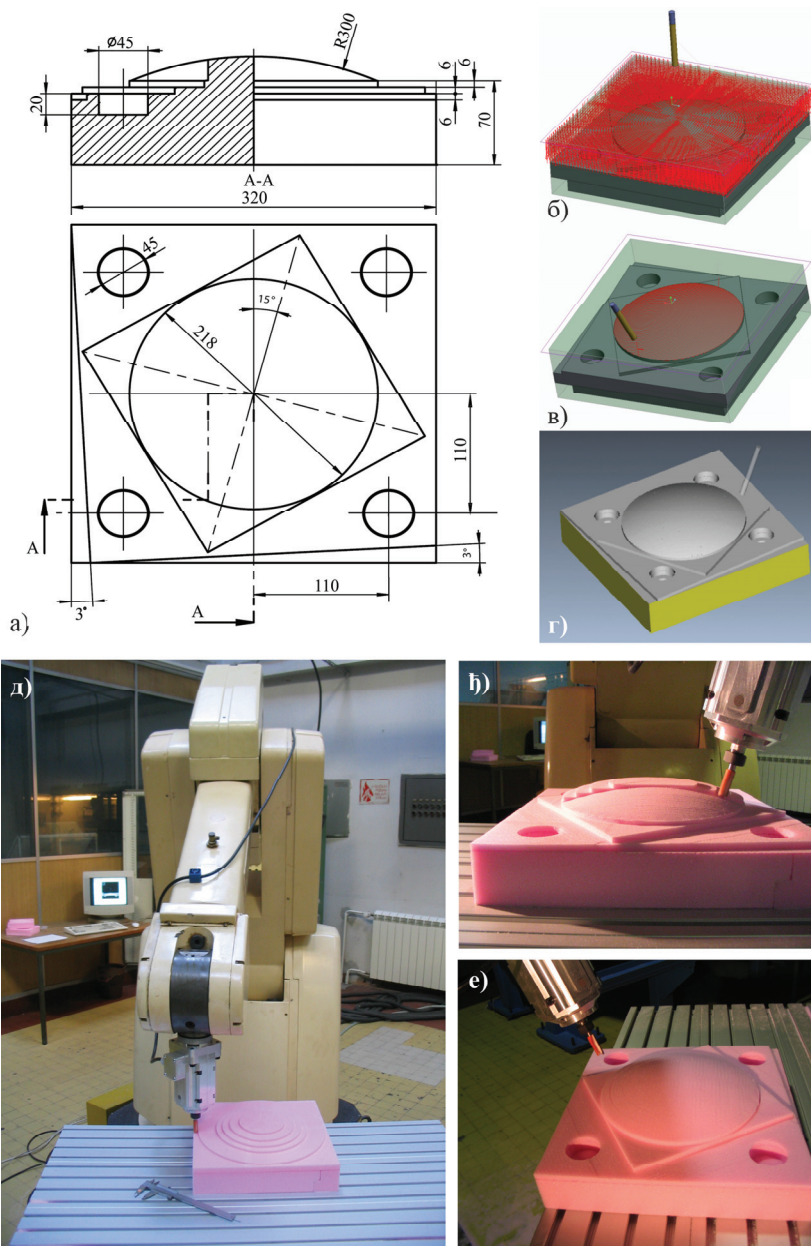
Слика 4.9 LinuxCNC интерфејс систем фирме General Mechatronics

За разлику од *BeagleBone Black* рачунара, *Raspberry Pi*, приказан на слици 4.10б, је развијен са намером да промовише информатику у школама и земљама у развоју, без претензија да се користи у управљачким апликацијама. Међутим, захваљујући *Preempt-RT* надградњи за *Linux* оперативни систем, могуће је извршавање *Machinekit CNC* софтвера у реалном времену и на *Raspberry Pi* хардверској платформи, као што је показано у раду [92].



Слика 4.10 Компактне рачунарске платформе

Било да се ради о *PC* рачунаркој платформи или се за управљање користе претходно поменути компактни рачунари величине кредитне картице, развој



Слика 4.18 Обработка првог пробног дела емулираном 5-осном вертикалном глодалицом (X, Y, Z, A, B) конфигурације

5 Виртуелни модели робота за обраду

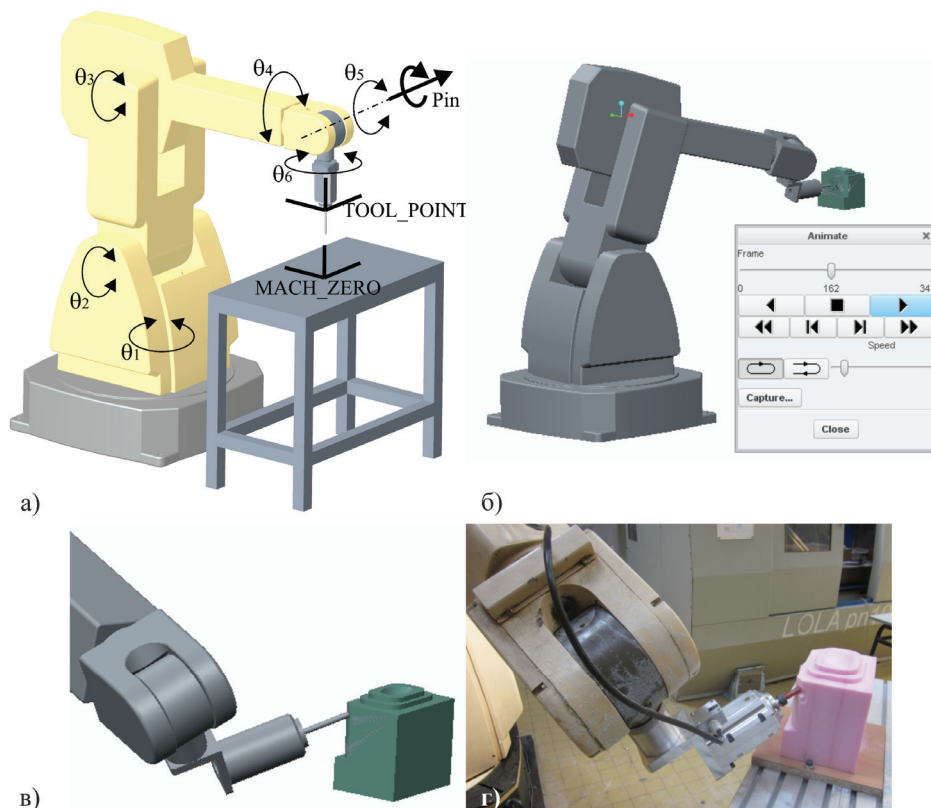
Симулација вишеосне обраде, која се данас изводи како на 5-осним машинама алаткама тако и на индустријским роботима, има велики значај у савременој производњи [5]. Виртуелни индустријски робот за обраду, слично као и виртуелна машина алатка, представља дигитални опис робота, обично са упрошћеном геометријом и користи се за потребе рачунарских симулација процеса обраде роботима, комплетирање виртуелног технолошког система, итд. Појам виртуелне машине алатке, па самим тим и робота за обраду, је широк и обухвата комплетне моделе процеса обраде, носеће структуре, погона, преносника, кинематичког подсистема итд. [3]. Сви ови модели се интегришу у јединствени систем софтвера, који омогућава неки део виртуелне производње [97]. Виртуелни индустријски роботи приказани у овом поглављу покривају само геометрију и кинематику реалног индустријског робота за обраду. Док постојећа графичка окружења *CAD/CAM* система уобичајено приказују симулацију путање алата, симулација виртуелног робота интегрисаног у систем управљања који се управља на исти начин, односно истим сигналима, као и стварни робот омогућава верну симулацију кретања самог робота [98].

Основне предности примене виртуелних 5-осних машина алатки и робота у задацима програмирања вишеосне обраде су [93, 99]:

- могућности провере кретања алата по програмираној путањи, узимајући у обзир ограничења у опсезима зглобова (унутрашњих координата) и брзина кретања оса,
- визуелна детекција колизија између сегмената, као и алата са радним предметом и стезним прибором, као и
- сама провера да ли је припремак коректно постављен унутар радног простора.

Другим речима, графичке симулације (*CAD/CAM* окружења) омогућавају комплетну верификацију *off-line* програмирања на удаљеном програмерском месту, без ангажовања самог робота, док у случајевима када је виртуелни робот конфигурисан као део управљачког система он се може користити за завршну верификацију програма и праћење обраде у реалном времену са удаљеног места, пошто је тада реч о симулацији у реалном времену целе конфигурације индустријског робота.

Овако конфигурисан *VIR* се учитава у *CAM* модул софтвера *PTC Creo* где се користи при верификацији путање алата дефинисане *CL* датотеком, слике 5.2б и 5.2в, након чега се уз одговарајући постпроцесор генерише G-код, односно програм за обраду роботом *ЛОЛА50*, слика 5.2г. Пре поступка постпроцесирања потребно је конфигурисати одговарајуће постпроцесоре за 5-осне машине алатке различитих конфигурација, слика 2.9. Конфигурисање се врши помоћу конфигурирања постпроцесора у *CAD/CAM* окружењу.



Слика 5.2 Дефинисање кинематичких веза и координатних система на роботу за обраду ЛОЛА50

5.1.2 Конфигурисање виртуелних робота за обраду у *STEP-NC Machine* окружењу

Метод програмирања робота за обраду помоћу *STEP-NC* стандарда је објектно оријентисани начин програмирања. Другим речима, ако се технолошки примитиви, на делу који треба направити, назову облицима

6 Идентификација и анализа статичке попустљивости робота

Грешке позиције врха робота односно алата при обради могу бити класификоване у две групе [8]:

- грешке изазване силама и моментима резања и
- грешке кретања (кинематичке, динамичке, итд.)

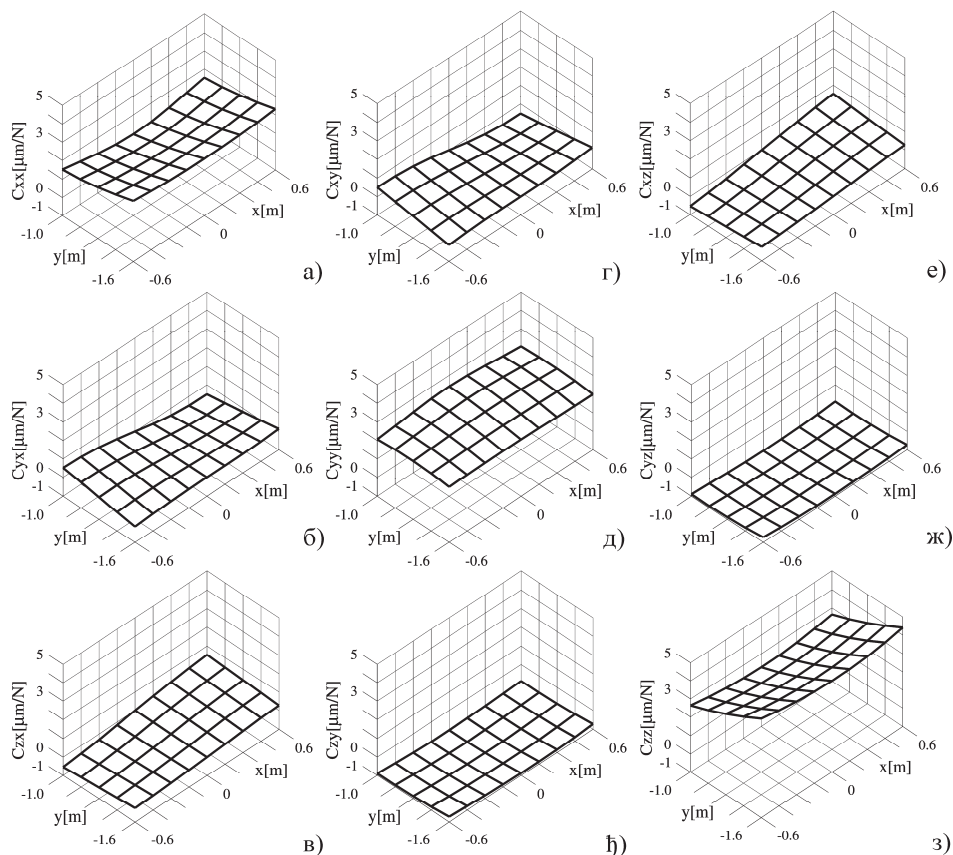
Грешке кретања, које су око 0.1mm , су својствене за систем управљања и постоје чак и без дејства силе на енд-ефектор. Како су отпори резања при глодању великим брзинама реда величине неколико стотина N , то грешке положаја врха алата изазване овим силама лако прелази вредност од 1mm , јер је крутост робота у просеку мања од $1N/\mu\text{m}$ док је крутост *CNC* машина алатки већа од $50N/\mu\text{m}$ [109, 110]. На крутост структуре робота утичу попустљивост зглобова, попустљивост преносника, геометријска својства и материјал сегмената структуре и базе као и активна попустљивост коју обезбеђује контролер робота [9]. Помераји врха алата код робота поред зависности од сила резања, зависе и од положаја алата у радном простору робота, другим речима сила, која делује на алат, у једном правцу изазива помераје алата у сва три Декартова правца [11]. При дејству сила резања услед попустљивости робота јављају се три врсте грешака [111]:

- статичке грешке,
- грешке изазване осцилацијама ниских фреквенци и
- грешке изазване осцилацијама високих фреквенци.

На алат при обради резањем, поред статичке силе, делује и динамичка компонента отпора резања [112]. Према [7, 111] највећи утицај на укупну грешку обраде, изазвану силама резања, имају грешке изазване статичком силом. При обради великим брзинама [113], статичка компонента отпора резања, односно средња вредност отпора резања [114, 115], у правцу нормале на обрађену површину при глодању је значајно већа од амплитуде динамичког отпора резања. Полазећи од ове чињенице, грешке изазване статичком компонентом силе резања се директно одражавају на тачност обраде па је њихова идентификација, моделирање и компензација од кључне важности за успешну примену робота у обради.

Користећи једначине (6.21) и (6.22), односно постављени модел попустљивости робота, могуће је анализирати и утицаје попустљивости сваког зглоба понаособ на директне и индиректне попустљивости робота у радном простору, слике 6.7 и 6.8.

Дистрибуције директних попустљивости у равни $z_M = 0mm$ које потичу од попустљивости сваког зглоба понаособ, представљене су на слици 6.7. На директне попустљивости C_{xx} и C_{yy} , слике 6.7а и 6.7б, највећи утицај имају попустљивости зглобова C_{θ_1} , C_{θ_3} и C_{θ_5} , док на директну попустљивост C_{zz} , слика 6.7в, највећи утицај имају попустљивости зглобова C_{θ_2} и C_{θ_3} .



Слика 6.6 Дистрибуција израчунатих попустљивости у равни $z_M = 0mm$ [122]

У циљу потпуне анализе утицаја попустљивости зглобова на попустљивост врха робота у Декартовом простору, извршена је и анализа утицаја попустљивости сваког зглоба понаособ на индиректне попустљивости.

7 Метод off-line компензације статичких грешака изазваних силама резања

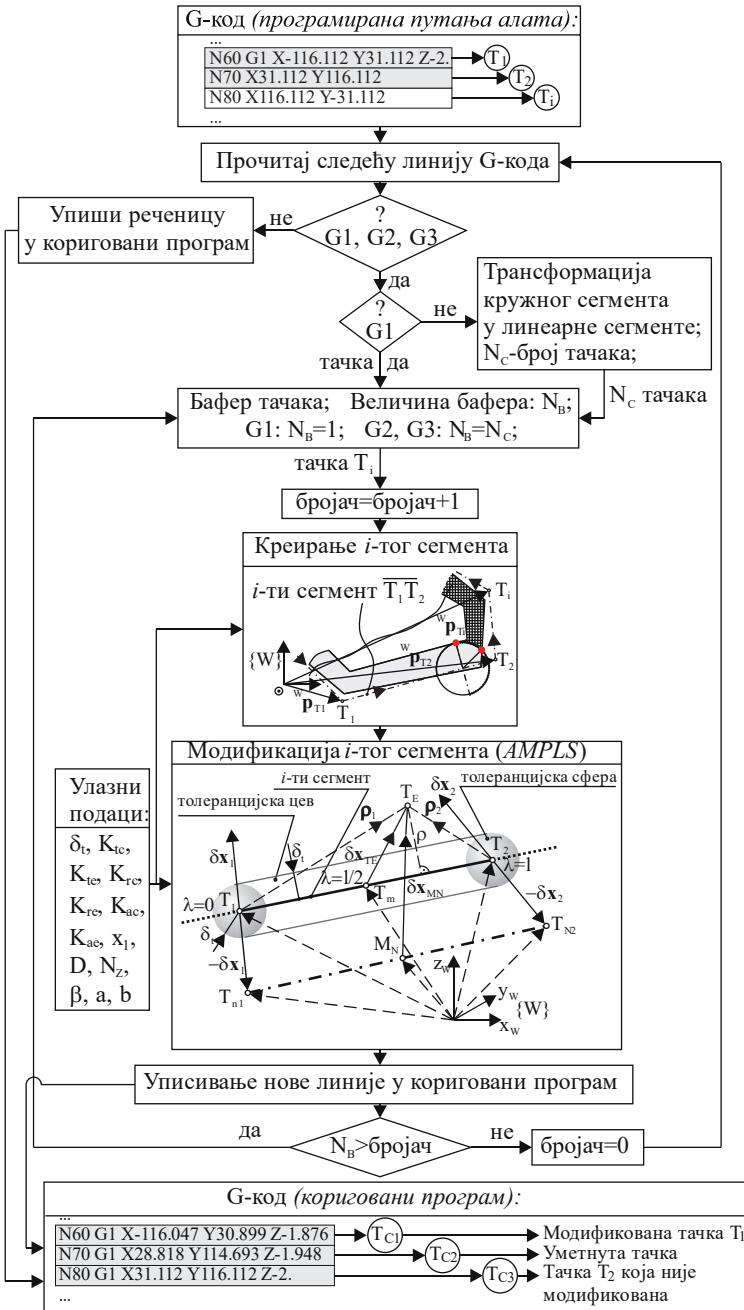
Развијени метод анализе и идентификације статичке попустљивости робота, као и могућности да се робот за обраду програмира у G -коду, представљали су основ за развој метода компензације грешака, изазваних силама резања [11, 126, 128], који је директно применљив од стране програмера и оператера који имају искуства у CNC технологији и програмирању у G -коду. Метод је базиран на могућности предиковања сила резања, на основу постојећих модела у литератури [46–48, 129, 130], у циљу израчунавања статичких помераја врха алата који узрокују грешке обраде. Развијени метод компензације грешака обраде подразумева модификацију програмиране путање, односно корекцију G -кода, применом развијеног алгоритма за модификацију програмираног линеарног сегмента путање. Алгоритам је развијен увођењем правила „половљења сегмента”, које је реализовано према аналогiji са алгоритмом који се користи код неких вишеосних машина алатки за корекцију грешака током линеарне интерполације оса оријентације у унутрашњим координатама.

7.1 Концепт метода компензације грешака

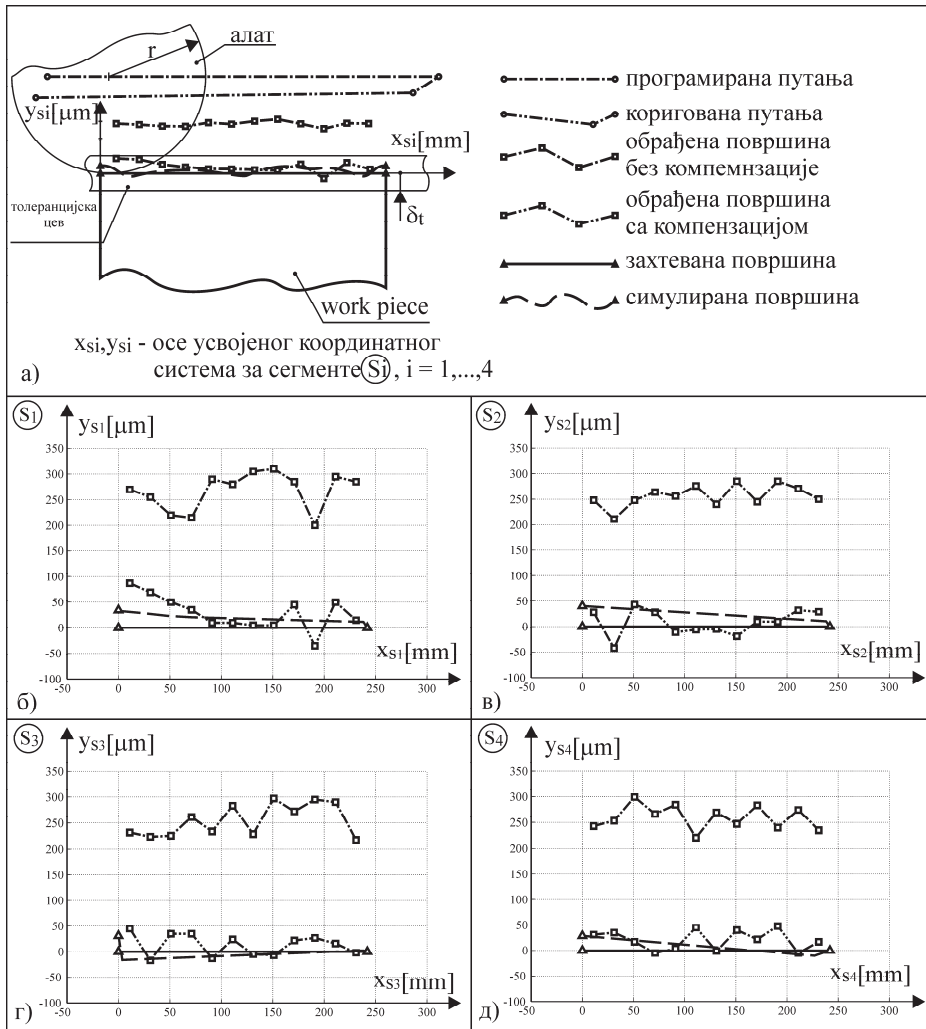
За приказ концепта развијеног метода компензације, слика 7.1, један праволинијски сегмент, програмиран као путања алата, T_1T_n , у G -коду, је подељена на $n - 1$ сегмента. При кретању алата дуж приказаног сегмента путање у току обраде, на њега у тачки $T_i(x_i, y_i, z_i)$, која је дефинисана у координатном систему обратка $\{W\}$, делује вектор сила резања $\mathbf{F}_i = [F_{xi}(x_i, y_i, z_i) \ F_{yi}(x_i, y_i, z_i) \ F_{zi}(x_i, y_i, z_i)]^T$. Под дејством вектора сила резања \mathbf{F}_i врх алата, уместо да пролази кроз тачку $T_i(x_i, y_i, z_i)$ пролази кроз тачку $T_{Ei}(x_{Ei}, y_{Ei}, z_{Ei})$ тако да је

$$\begin{bmatrix} x_{Ei} \\ y_{Ei} \\ z_{Ei} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \delta \mathbf{x}_i \quad (7.1)$$

где $\delta \mathbf{x}_i = [\delta x_i \ \delta y_i \ \delta z_i]^T$ представља вектор помераја врха робота, дефинисан у координатном систему обратка $\{W\}$, односно грешку обраде услед дејства вектора сила резања \mathbf{F}_i .



Слика 7.4 Алгоритам за корекцију програмиране путање [11]



Слика 7.17 Упоредни графички приказ резултата добијених на издвојеним сегментима квадрата

На претходно приказаним сликама се види да се и пројекција симулиране виртуелне обрађене површине, за сваки посматрани сегмент квадрата, налази у границама грешака добијених на површини обрађеној са компензацијом грешака, односно довољно близу њих. Резултати експеримента показују да развијени виртуелни модел робота даје довољно добре резултате при симулацији обрађене површине пре обраде на самом роботу, у циљу провере коригованог програма генерисаног применом *off-line* компензационог алгоритма.

8 Примена стандарда STEP-NC у програмирању и симулацији обраде роботима

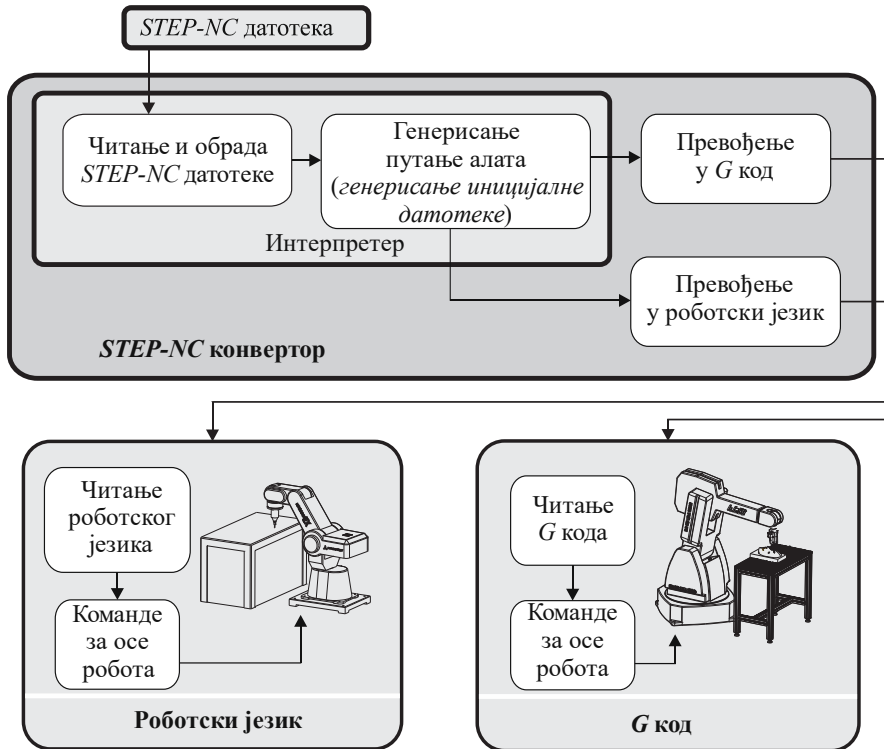
Данас се нови стандард, познат као *STEP-NC* [132–136], користи као основ за развој нове генерације *CNC* контролера за нову генерацију машина алатки. Нови стандарди су *ISO 14649* и *ISO 10303-238*. Након више од деценије истраживања у области примене *STEP-NC* стандарда, односно у развоју нових управљачких система и метода програмирања машина алатки применом *STEP-NC* протокола, то и даље представља изазован истраживачки задатак [137]. С обзиром на то да се индустријски роботи све више користе у задацима обраде, неопходно је прилагодити и начин програмирања робота у задацима обраде применом нових стандарда [138]. Примери примене *STEP-NC* стандарда у програмирању робота за задатке обраде могу се наћи у неколико радова [138–141].

У раду [138] је приказан развој *Robot CAM* модула који *STEP-NC* програм, која представља улаз, интерпретира, преводи и команде кретања прослеђује индустријским роботима за обраду. На овај начин генерисане путање алата су верификоване њиховим испрцавањем роботом.

У раду [139] је представљена *RoboCAD INFELT STEP* платформа која омогућава корисницима да програмирају кретање робота на основу *CAD* података у *STEP* формату. Платформа се састоји из неколико међусобно повезаних нивоа, који се користе за размену програмских података између контролера робота, задатка и *CAD* софтвера, у циљу интегрирања програмских података заснованих на *STEP* стандарду.

У раду [140] су представљени модели индустријских робота, у складу са *STEP* стандардом, којима је омогућена размена информација између различитих *CAX* система и *off-line* система за програмирање. Како је наведено у раду, представљени прототип *off-line* система за програмирање, који укључује и *3D* виртуелно окружење, доноси погодности везане, како за симулацију система робота, тако и за унапређење традиционалних контролера робота.

синтаксом и семантиком роботског програмског језика. Транслатор језика је програм који читањем комплетне *P21* датотеке генерише иницијалну датотеку, са информацијама неопходним за генерисање датотеке на програмском језику робота.

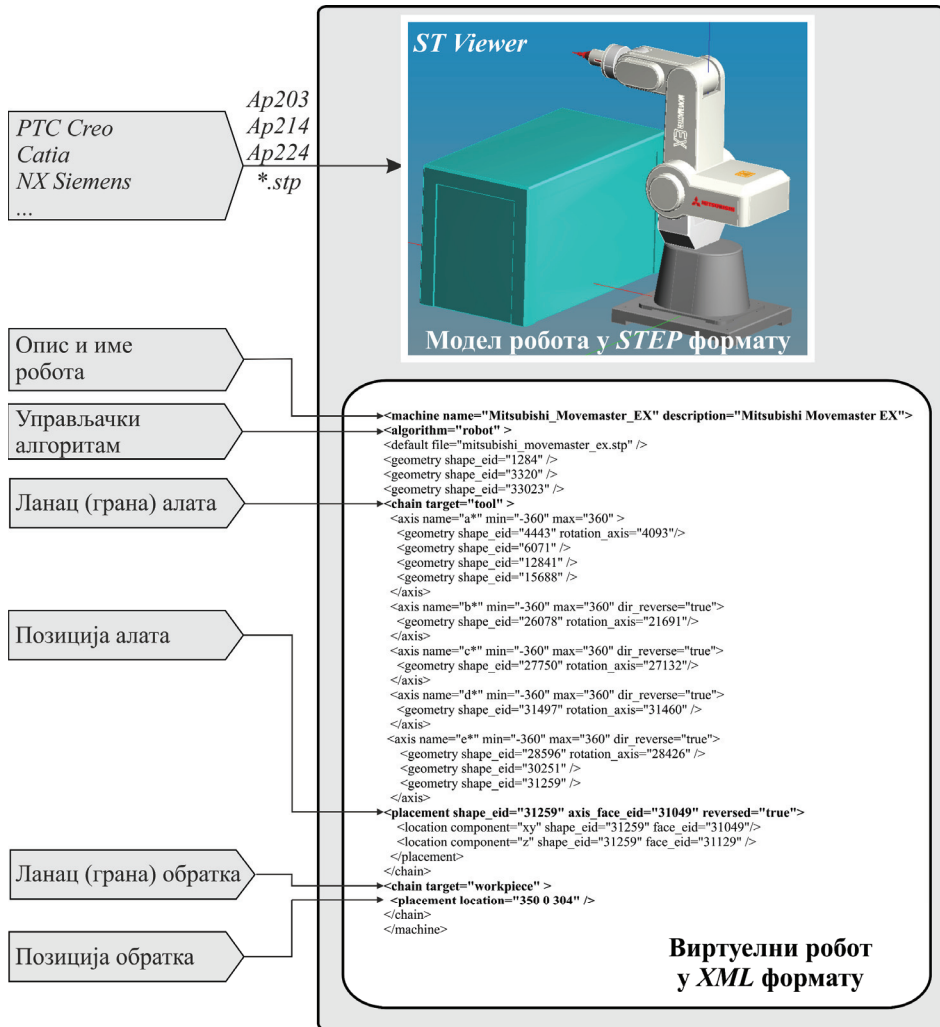


Слика 8.3 Индиректни метод програмирања робота на бази STEP-NC протокола

Тако генерисани код иницијалне датотеке се може у општем случају превести на одговарајући програмски језик робота, уз познавање његове синтаксе. У оквиру представљених истраживања су разматрана два случаја за расположиве роботе: (i) превођење кода иницијалне датотеке на *G*-код (за робот *ЛОЛАЗ50*), и (ii) превођење кода иницијалне датотеке на код програмског језика робота *Mitsubishi Movemaster EX*.

8.2 Методологија за програмирање робота на бази STEP-NC протокола

Методологија за програмирање робота за обраду на бази *STEP-NC* протокола [103, 104, 143] описана је коришћењем *IDEF0* дијаграма [144, 145]. *IDEF0* дијаграми се овде користе да се формализује опис индиректног метода



Слика 8.6 Приказ Mitsubishi Movemaster EX робота у STEP и XML формату

За конфигурисање виртуелног робота, према описаној процедури у поглављу 5.1.2, потребно је: (i) припремити CAD модел робота, (ii) експортирати модел робота у STEP формату (протокол AP203, AP214 или AP224), (iii) конфигурирати кинематички ланац робота у XML формату и интегрисати STEP и XML датотеку робота у STEP-NC Machine софтверско окружење [103, 104]. Конфигурисање виртуелних робота у STEP-NC Machine окружењу, услед недостатка машина алатки и робота које могу директно да интерпретирају STEP-NC програм, је важно јер се на овај начин могу

9 Закључак

Примена индустријских робота у обради резањем постаје актуелан начин да се скупе 5-осне машине алатке замене економичнијим решењем при обради мекших материјала, (као што су дрво, алуминијум, пластика итд.), већих димензија и ниже класе тачности. Индустријски робот ће, уз решавање проблема програмирања и попустљивости, у поменутом сегменту имати задовољавајућу тачност, али са далеко већим радним простором и брзинама обраде у односу на 5-осне машине алатке. Идеја да се *CAD/CAM* системи, који се користе за програмирање 5-осних машина алатки посредством *G*-кода, искористе за програмирање вишеосне обраде резањем роботом, наводи на приступ развоју управљачког система отворене архитектуре, који треба да омогући емулацију различитих конфигурација хоризонталних и вертикалних 5-осних машина алатки роботима вертикалне зглобне конфигурације.

У оквиру приказаних истраживања разматрана је реконфигурабилна ћелија за обраду на бази 6-осног робота који су емулира хоризонталне и/или вертикалне 5-осне машине алатке, чиме се избегавају и проблеми сингуларитета робота, као и проблеми ограничења кретања у зглобовима. Према усвојеном концепту реконфигурабилне роботске ћелије за обраду, развијен је генерализован приступ кинематичког моделирања, који је представљао основ за развој система управљања који има могућност програмирања у *G*-коду. Према постављеној методологији, развијено је и комплетно имплементирано неколико конфигурација управљачког система базираног на *PC real-time Linux* платформи и *LinuxCNC* софтверском систему. Посредством конфигурационог интерфејса, који је интегрални део *LinuxCNC* софтвера, омогућен је избор одговарајуће конфигурације управљачког система. Такође, у циљу развоја симулационих окружења, развијени су и виртуелни обрадни системи на бази робота. Применом *OpenGL* библиотека развијен је софтверски систем који омогућава моделирање и анимацију виртуелних робота у функцији програма обраде, односно сигнала са сензора позиција робота у реалном времену.

Полазећи од кинематичких модела робота детаљно је разматран проблем моделирања, анализе, идентификације и компензације статичке попустљивости робота. Прво је развијен модел статичке попустљивости робота, применом принципа виртуелног рада и Јакобијан матрице. Развијени

Литература

1. Moriwaki T (2008) Multi-functional machine tool. *CIRP Annals*, 57:736–749
2. Koren Y, Heisel U, Jovane F, Moriwaki T, Pritschow G, Ulsoy G, Van Brussel H (1999) Reconfigurable manufacturing systems. *CIRP Annals*, 48:527–540
3. Altintas Y, Brecher C, Weck M, Witt S (2005) Virtual machine tool. *CIRP Annals*, 54:115–138
4. Verl A, Valente A, Melkote S, Brecher C, Ozturk E, Tunc LT (2019) Robots in machining. *CIRP Annals*, 68:799–822
5. DePree J, Gesswein C (2008) Robotic machining white paper project. Halcyon Development-Robotic Industries Association (RIA)
6. Lehmann C, Pellicciari M, Drust M, Gunnink JW (2013) Machining with industrial robots: the COMET project approach. *International Workshop on Robotics in Smart Manufacturing*. Porto, pp 27–36
7. Abele E, Weigold M, Rothenbücher S (2007) Modeling and identification of an industrial robot for machining applications. *CIRP Annals*, 56:387–390
8. Pan Z, Zhang H (2008) Robotic machining from programming to process control: a complete solution by force control. *Industrial Robot: An International Journal*, 35:400–409
9. Alici G, Shirinzadeh B (2005) Enhanced stiffness modeling, identification and characterization for robot manipulators. *IEEE transactions on robotics*, 21:554–564
10. Olabi A, Damak M, Bearee R, Gibaru O, Leleu S (2012) Improving the accuracy of industrial robots by offline compensation of joints errors. *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology 2012*. Athens, pp 492–497
11. Славковић Н (2015) Идентификација, моделирање и компензација грешака услед статичке попустљивости робота за обраду. Докторска дисертација, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд
12. Димић З (2016) Управљачки систем отворене архитектуре реконфигурабилних роботских хелија за обраду. Докторска дисертација, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд

13. Милутиновић Д, Главоњић М, Славковић Н, Димић З, Кокотовић Б, Живановић С (2010) Реконфигурабилни обрадни систем на бази робота за вишеосну обраду делова већих габарита са сложеним естетским и функционалним површинама од мекших материјала средње и ниже класе тачности. Техничко решење, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд
14. Vergeest JSM, Tangelder JWH (1996) Robot machines rapid prototype. *Industrial Robot: An International Journal*, 23:17–20
15. Gerke W (2004) Milling robot with 3D vision system for styrofoam modelling. *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Robotics part II. Aachen*, pp 192–196
16. Klimchik A, Pashkevich A, Chablat D, Hovland G (2013) Compliance error compensation technique for parallel robots composed of non-perfect serial chains. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29:385–393
17. Dumas C, Caro S, Garnier S, Furet B Joint Stiffness Identification of Six-revolute Industrial Serial Robots. 27:881–888
18. Elatta AY, Gen LP, Zhi FL, Daoyuan Y, Fei L (2004) An overview of robot calibration. *Information Technology Journal*, 3:74–78
19. Rolland LH (2003) Outils algébriques pour la résolution de problèmes géométriques et l'analyse de trajectoire de robots parallèles prévus pour des applications à haute cadence et grande précision. Thèse de doctorat
20. Meggiolaro MA, Dubowsky S, Mavroidis C (2005) Geometric and elastic error calibration of a high accuracy patient positioning system. *Mechanism and Machine Theory*, 40:415–427
21. Kim H-C (2011) Tool path generation and modification for constant cutting forces in direction parallel milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 52:937–947
22. URL: <https://www.staubli.com/en/robotics>
23. URL: <https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/industrial-robots>
24. URL: <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-6660>
25. URL: <http://www.fanuc.eu/bg/en/robots>
26. URL: <https://pdf.directindustry.com/pdf/kuka-ag/kukacamrob-complete-robotic-systems-automatic-cnc-machining/17587-24135.html>
27. URL: <http://robot.fanucamerica.com/products/vision-software/ROBOGUIDE-simulation-software.aspx>
28. URL: <https://pdf.directindustry.com/pdf/motoman/motoman-g-code-converter-eg/14474-93592.html>
29. URL: <http://new.abb.com/products/robotics/application-software/machining/robotware-machining-fc>
30. URL: <http://www.robotmaster.com>
31. URL: <https://www.sprutcam.com/sprutcam-and-solutions/sprutcam-robot>

32. URL: <https://manufacturing.autodesk.com/solutions/robotics>
33. URL: <http://new.abb.com/products/robotics/robotstudio>
34. Mooring BW, Roth ZS, Driels MR (1991) Fundamentals of manipulator calibration. John Wiley & Sons
35. Vannocci M, Colla V (2014) Kinematic Calibration Procedure for Anthropomorphic Robots. Chugo D, Yokota S (eds) Introduction to Modern Robotics II. iConcept press
36. Bennett D, Hollerbach J, Henri P (1992) Kinematic calibration by direct estimation of the Jacobian matrix. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Nice, pp 351–357
37. Pan F, Li M, Yin J (2013) Error model and accuracy calibration of 5-axis machine tool. TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering, 11:4251–4259
38. Xing K, Achiche S, Esmaeili S, Mayer JRR (2018) Comparison of Direct and Indirect Methods for Five-axis Machine Tools Geometric Error Measurement. Procedia CIRP, 78:231–236
39. Kvrđić V, Dimić Z, Cvijanović V, Ilić D, Bucan M (2012) A control algorithm for a vertical five-axis turning centre. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 61:569–584
40. Kvrđić V, Dimić Z, Cvijanović V, Vidaković J, Kablar N (2014) A control algorithm for improving the accuracy of five-axis machine tools. International Journal of Production Research, 52:2983–2998
41. Gong C, Yuan J, Ni J (2000) Nongeometric error identification and compensation for robotic system by inverse calibration. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40:2119–2137
42. Klimčik A (2011) Enhanced stiffness modeling of serial and parallel manipulators for robotic-based processing of high performance materials. Doctoral dissertation
43. Zhang D (2000) Kinetostatic Analysis and Optimization of Parallel and Hybrid Architectures for Machine Tools. Doctoral dissertation
44. Quennouelle C (2009) Modelisation geometrico-statique des mecanismes paralleles compliants. Thèse de doctorat
45. Majou F (2004) Kinetostatic analysis of translational parallel kinematic machines. Doctoral dissertation
46. Altintas Y (2000) Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design. Cambridge University Press
47. Budak E (2006) Analytical models for high performance milling. PartI: cutting forces, structural deformations, and tolerance integrity. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46:1478–1488
48. Кокотовић Б, Славковић Н (2014) Верификације процедуре предиковања сила при обради цилиндричним вретенастим глодалима. Зборник радова 39. ЈУПИТЕР конференције, 35. симпозијум НУ-Роботи-ФТС. Београд, pp 3.67-3.74

49. Abele E, Bauer J, Rothenbucher S, Stelzer M, Stryk O (2008) Prediction of the Tool Displacement by Coupled Models of the Compliant Industrial Robot and the Milling Process. Proceedings of the International Conference on Process Machine Interactions. Hannover, pp 223–230
50. Depince P, Hascoet JY (2006) Active integration of tool deflection effects in end milling. Part 2. Compensation of tool deflection. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46:945–956
51. Slavković N, Dimić Z, Živanović S, Milutinović M (2018) Kinematic modeling of 5-axis horizontal milling machine emulated from vertical articulated robot. *FME Transactions*, 46:46–56
52. ISO 841:2001 Industrial automation systems and integration—Numerical control of machines—Coordinate system and motion nomenclature
53. Affouard A, Duc E, Lartigue C, Langeron JM, Bourdet P (2004) Avoiding five-axis singularities using tool path deformation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44:415–425
54. Milutinovic D, Glavonjic M, Slavkovic N, Dimic Z, Zivanovic S, Kokotovic B, Tanovic L (2011) Reconfigurable robotic machining system controlled and programmed in a machine tool manner. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53:1217–1229
55. Milutinovic D, Glavonjic M, Slavkovic N, Kokotovic B, Milutinovic Milan, Zivanovic S, Dimic Z (2011) Machining robot controlled and programmed as a machine tool. Proceedings of 10th Anniversary International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology DEMI 2011. Banja Luka, pp 863–872
56. Milutinovic D, Slavkovic N, Zivanovic S, Glavonjic M (2014) Low-cost control and programming system for five-axis machining by articulated robots with 5 and 6 dof. Proceedings of 5th International Conference on Manufacturing Engineering ICMEN. Thessaloniki, pp 133–142
57. URL: <http://www.linuxcnc.org>
58. Lee R-S, She C-H (1997) Developing a postprocessor for three types of five-axis machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 13:658–665
59. Paul RP (1981) Robot manipulators: mathematics, programming, and control: the computer control of robot manipulators. MIT Press
60. Fu KS, Gonzalez RC, Lee CSG (1987) Introduction to Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence. McGraw-Hill
61. Craig JJ (1989) Introduction to Robotics: Mechanics and Control, 2nd ed. Addison-Wesley
62. Spong MW, Vidyasagar M (1989) Robot Dynamics and Control. John Wiley & Sons
63. Mansour R, Doty KL (1992) Fast inverse kinematics of five-revolute-axis robot manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, 27:587–597

64. Pashkevich A (1997) Real-time inverse kinematics for robots with offset and reduced wrist. *Control Engineering Practice*, 5:1443–1450
65. Tsai L-W (1999) *Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators*. John Wiley & Sons
66. Sciavicco L, Siciliano B (2001) *Modelling and control of robot manipulators*. Springer-Verlag
67. McKerrow PJ (1991) *Introduction to Robotics*. Addison Wesley
68. Innocenti C, Parenti C (1994) Exhaustive enumeration of fully parallel kinematic chains. *Dynamic System and Control*, ASME, 55:1135–1141
69. Milutinovic M, Slavkovic N, Milutinovic D (2013) Kinematic modelling of hybrid parallel-serial five-axis machine tool. *FME Transactions*, 41:1–10
70. Bi ZM, Lang SYT, Verner M, Orban P (2008) Development of reconfigurable machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39:1227–1251
71. Zhang H, Wang J, Zhang G, Gan Z, Pan Z, Cui H, Zhu Z (2005) Machining with flexible manipulator: toward improving robotic machining performance. *Proceedings of International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics IEEE/ASME 2005*. Monterey, pp 1127–1132
72. Olabi A, Bearee R, Gibaru O, Damak M (2013) Feedrate planning for machining with industrial six-axis robots. *Control Engineering Practice*, 18:471–482
73. Li W, Red E, Jensen G, Evans M (2007) Reconfigurable Mechanisms for Application Control (RMAC): Architecture. *Computer-Aided Design and Applications*, 4:539–547
74. Li W, Red E, Jensen G, Evans M (2007) Reconfigurable mechanisms for application control (RMAC): Applications. *Computer-Aided Design and Applications*, 4:539–547
75. Shirase K, Hirao M, Yasui T (1994) End Milling for Articulated Robot Application (1st report). *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C*, 60:1070–1076
76. Shirase K, Mizuhara N, Hirao M, Yasui T (1994) End Milling for Articulated Robot Application (2nd report). *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C*, 60:1077–1083
77. Shirase K, Tanabe N, Hirao M, Yasui T (1995) End Milling for Articulated Robot Application (3rd report). *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C*, 61:259–265
78. Solvang B, Sziebig G, Korondi P (2008) Vision based robot programming. *Proceedings of IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control 2008*. Sanya, pp 949–954
79. Shirase K, Tanabe N, Hirao M, Yasui T (1996) Articulated robot application in end milling of sculptured surface. *JSME international journal Ser C, Dynamics, control, robotics, design and manufacturing*, 39:308–316

80. Hu YN, Chen YH (1999) Implementation of a robot system for sculptured surface cutting. Part 1. Rough machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15:624–629
81. Ko JH, Yun WS, Kang SJ, Cho D-W, Ahn KG, Yun SH (1999) Feature-based robot machining for rapid prototyping. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 213:451–459
82. Huang H-K, Lin GCI (2002) Development of a dual-robot system for prototype production. *International journal of production research*, 40:3751–3764
83. Hu YN, Chen YH (1999) Implementation of a robot system for sculptured surface cutting. Part 2. Finish machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15:630–639
84. Plug-and-produce COmponents and METHods for adaptive control of industrial robots enabling cost effective, high precision manufacturing in factories of the future. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/258769/de>
85. Ferenc G, Dimić Z, Lutovac M, Vidaković J, Kvrđić V (2013) Open architecture platforms for the control of robotic systems and a proposed reference architecture model. *Transactions of FAMENA*, 37:89–100
86. Ferenc G, Dimić Z, Lutovac M, Kvrđić V, Cvijanović V (2012) Distributed robot control system based on the real-time linux platform. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 2:184–189
87. Živanović S, Glavonjić M, Dimić Z (2009) Methodology for configuring desktop 3-axis parallel kinematic machine. *FME Transactions*, 37:107–115
88. Glavonjic M, Milutinovic D, Zivanovic S, Dimic Z, Kvrđić V (2010) Desktop three-axis parallel kinematic milling machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46:51–60
89. Milutinovic D, Slavkovic N, Kokotovic B, Milutinovic M, Zivanovic S, Dimic Z (2012) Kinematic modeling of reconfigurable parallel robots based on Delta concept. *Journal of Production Engineering*, 15:71–74
90. Živanović S, Milutinović D, Slavković N, Dimić Z (2015) Testing and programming mini laboratory and desktop 3-axis parallel kinematic milling machine. *Journal of Production Engineering*, 18:43–46
91. Živanović S, Dimić Z, Vasilic G, Kokotović B (2018) Konfigurisanje virtualne rekonfigurabilne dvoosne mašine sa paralelnom kinematikom integrisane sa CNC sistemom otvorene arhitekture na bazi EMC2 softvera. *Tehnika*, 73:519–526
92. Živanović S, Vorkapić N, Dimić Z (2019) Konfigurisanje sistema za programiranje i upravljanje 3-osne mini CNC mašine alatke na Raspberry Pi platformi. *Tehnika*, 74:823–831
93. Dimic Z, Milutinovic D, Zivanovic S, Kvrđić V (2016) Virtual environment in control and programming system for reconfigurable machining robot. *Tehnički vjesnik*, 23:1821–1829
94. Vasilic G, Zivanovic S, Kokotovic B, Dimic Z (2019) Configuring and analysis of a class of generalized reconfigurable 2-axis parallel kinematic machine. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33:3407–3421

95. ISO 10791-7:1998 Test conditions for machining centres - Part 7: Accuracy of a finished test piece
96. AIA/NAS - NAS979: Uniform cutting tests - NAS series metal cutting equipment specifications
97. Go J-H, Yun W-S, Gang S-J, Jo D-U, An G-G, Yun S-H (2001) Development of a Virtual Machine Tool-Part 2 (Dynamic Cutting Force Model, Thermal Behavior Model, Feed Drive Model and Comprehensive Software Environment) Environment. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 18:80–85
98. Živanović S, Glavonjić M, Dimić Z (2012) Konfigurisanje virtuelne mašine troosne glodalice sa paralelnom kinematikom za simulaciju i verifikaciju upravljanja i programiranja. *Zbornik XI međunarodno naučnostručnog Simpozijuma Infoteh-Jahorina. Jahorina*, pp 464–469
99. Zivanovic S, Slavkovic N, Kokotovic B, Milutinovic D (2017) Machining simulation of virtual reconfigurable 5-axis machine tool. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 15:189–194
100. URL: <http://www.instantreality.org/vrax>
101. URL: <http://www.ptc.com/cad/creo/parametric>
102. URL: <http://www.steptools.com/products/stepncmachine>
103. Zivanovic S, Slavkovic N, Milutinovic D (2018) An approach for applying STEP-NC in robot machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49:361–373
104. Slavkovic N, Zivanovic S, Milutinovic D (2019) An indirect method of industrial robot programming for machining tasks based on STEP-NC. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32:43–57
105. Зельковић М, Табаковић С, Живковић А, Живановић С, Млађеновић Ц, Кнежев М (2018) Основе CAD/CAE/CAM технологија. Универзитет у Новом Саду, Факултет Техничких наука
106. Glavonjić M (2014) Objektno programiranje mašina alatki. *Mašine alatke M, Podsetnik za temu AN-5, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet*
107. Slavkovic N, Zivanovic S, Milutinovic D, Kokotovic B (2017) Robot machining simulation in STEP-NC Machine environment. *Proceedings of 13th International conference on accomplishments in mechanical and industrial engineering DEMI 2017. Banja Luka*, pp 43–50
108. Zivanovic S, Slavkovic N, Dimic Z, Vasilic G, Puzovic, Radovan, Milutinovic D (2017) Virtual machine tools and robots for machining simulation based on STEP-NC program. *Proceedings of 6th International Conference on Manufacturing Engineering ICMEN 2017. Thessaloniki*, pp 41–51
109. Abele E, Rothenbucher S, Weigold M (2008) Cartesian compliance model for industrial robots using virtual joints. *Production Engineering*, 2:339–343
110. Zengxi P, Zhang H, Zhu Z, Wang J (2006) Chatter analysis of robotic machining process. *Journal of materials processing technology*, 173:301–309

111. Stelzer M, Von Stryk O, Abele E, Bauer J, Weigold M (2008) High speed cutting with industrial robots: towards model based compensation of deviations. *Proceedings of Robotik. Munich*, pp 143–146
112. Калајић М (2008) Технологија машиноградње. Универзитет у Београду, Машински факултет
113. Abele E, Bauer J, Bertsch C, Laurischkat R, Meier H, Reese S, Stelzer M, Von Stryk O (2008) Comparison of Implementations of a Flexible Joint Multibody Dynamics System Model for an Industrial Robot. *Proceedings of the 6th CIRP International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. Naples*, pp 23–25
114. Lehmann C, Halbauer M, Euhus D, Overbeck D (2012) Milling with industrial robots: Strategies to reduce and compensate process force induced accuracy influences. *Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012). Krakow*, pp 1–4
115. Toh CK (2004) Static and dynamic cutting force analysis when high speed rough milling hardened steel. *Materials & Design*, 25:41–50
116. Asada H, Slotine J-J (1986) *Robot analysis and control*. John Wiley & Sons
117. Милутиновић, Д (2019) Индустијски роботи, уџбеник у припреми. Универзитет у Београду, Машински факултет
118. Angeles J (2007) *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms*. Springer International Publishing
119. Duffy J (1996) *Statics and Kinematics with Applications to Robotics*. Cambridge University Press
120. Pashkevich A, Chablat D, Wenger P Stiffness analysis of overconstrained parallel manipulators. 44:966–982
121. Milutinovic D, Milacic V (1996) Micro scara robot as universal adaptive compliant wrist. *CIRP Annals*, 45:31–34
122. Slavkovic N, Milutinovic D, Kokotovic B, Glavonjic M, Zivanovic S, Ehmann K (2013) Cartesian compliance identification and analysis of an articulated machining robot. *FME Transactions*, 41:83–95
123. Slavković N, Zivanović S, Milutinović D, Glavonjić M (2012) Compliance analysis of an articulated machining robot. *Strojarstvo*, 54:229–235
124. Milutinovic D, Glavonjic M, Slavkovic N, Zivanovic S, Kokotovic B, Dimic Z (2011) Compliance analysis of 5-axis vertical articulated machining robot. *Proceedings of 4th International Conference on Manufacturing Engineering ICMEN. Thessaloniki*, pp 411–422
125. Abele E, Kulok M, Weigold V (2005) Analysis of a machining industrial robot. *Proceedings of the 10th International Scientific Conference on Production Engineering. Lumbarda*, pp II 1-11

126. Slavkovic N, Milutinovic D, Glavonjic M (2014) A method for off-line compensation of cutting force-induced errors in robotic machining by tool path modification. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70:2083–2096
127. MathWorks (2014) Matlab Documentation
128. Славковић Н, Милутиновић Д, Живановић С, Кокотовић Б, Милутиновић М (2016) Метод компензације грешака изазваних силама резања при обради роботима. Техничко решење, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд
129. Faassen RPH (2007) Chatter Prediction and Control for High-Speed Milling: Modelling and Experiments. Doctoral dissertation
130. Кокотовић Б (2013) Обрада глодањем у виртуелном обрадном систему. Докторска дисертација, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд
131. Ammar A, Bouaziz Z, Zghal A (2009) Modelling and simulation of the cutting forces for 2.5D pockets machining. *Advances in Production Engineering & Management*, 4:163–176
132. STEP-NC Newsletter, Issue 2, July 2000. <http://www.step-nc.org/data/newsletter2.pdf>
133. STEP-NC Newsletter, Issue 3, November 2000. <http://www.step-nc.org/data/newsletter3.pdf>
134. STEP-NC Newsletter, Issue 5, September 2003. <http://www.step-nc.org/data/newsletter5.pdf>
135. Xu XW, Newman ST (2006) Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent - A review of the technologies. *Computers in Industry*, 57:141–152
136. Kramer TR, Proctor F, Xu X, Michaloski JL (2006) Run-time interpretation of STEP-NC: implementation and performance. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 19:495–507
137. Xiao W, Zheng L, Huan J, Lei P (2015) A complete CAD/CAM/CNC solution for STEP-compliant manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 31:1–10
138. Solvang B, Refsahl LK, Sziebig G (2009) STEP-NC based industrial robot CAM system. *IFAC Proceedings Volumes*, 42:245–250
139. Valilai OF, Nodeh MJ, Houshmand M (2010) RoboCAD INFELT STEP, Interoperable Platform to Manage Collaboration among CAD and Robot Programming Agents Integrated Based on STEP (ISO 10303) Standard. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*. San Francisco, pp 350–356
140. Xiao W, Huan J, Dong S (2014) A STEP-compliant Industrial Robot Data Model for robot off-line programming systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 30:114–123

141. Rea Minango SN, Ferreira JCE (2017) Combining the STEP-NC standard and forward and inverse kinematics methods for generating manufacturing tool paths for serial and hybrid robots. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30:1203–1223
142. Rauch M, Laguionie R, Hascoet J-Y, Suh S-H (2012) An advanced STEP-NC controller for intelligent machining processes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28:375–384
143. Živanović S, Slavković N, Milutinović D (2018) Metodologija programiranja robota za obradu na bazi STEP-NC protokola. Zbornik radova 41. JUPITER konferencije, 37. Simpozijum NU-ROBOTI-FTS. Beograd, pp 3.60-3.67
144. Sääski J, Salonen T, Paro J (2005) Integration of CAD, CAM and NC with Step-NC. *VTT Industrial Systems*
145. Živanović S, Glavonjić M (2014) Methodology for implementation scenarios for applying protocol STEP-NC. *Journal of Production Engineering*, 17:71–74

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

621.9-52:004.42

СЛАВКОВИЋ, Никола, 1981-

Развој реконфигурабилног обрадног система
на бази робота / Никола Славковић, Зоран Димић.
- Београд : Универзитет, Машински факултет, 2020
(Београд : Planeta print). - III, 176 стр. : илустр.
; 25 cm

Тираж 100. - Библиографија: стр. 167-176.

ISBN 978-86-6060-044-0

1. Димић, Зоран Ж., 1968- [аутор]

а) Машине алатке - Програмирање

COBISS.SR-ID 17106953

Изводи из рецензије:

... Развијени алгоритам за компензацију грешака, насталих као последица сила резања, је значајно допринео побољшању тачности обраде роботима. Развојем система програмирања робота у G-коду са могућношћу употребе постојећих CAD/CAM система је омогућено да реконфигурабилни систем буде директно применљив од стране програмера и оператера који имају искуства у CNC технологији и програмирању у G-коду ... Конфигурисани виртуелни роботи, чије се осе погоне идентичним управљачким сигнаlima као и реални робот, симулацију обраде чине врло значајном у циљу избегавања сингуларних конфигурација робота унутар радног простора и провере постављања и базирања припремка у границама радног простора.

Др Драган Милутиновић, редовни професор у пензији, Машински факултет, Универзитет у Београду

... Монографска публикација „Развој реконфигурабилног обрадног система на бази робота“ представља значајно оригинално научно дело са високим доприносом у области производног машинства и индустријске роботике. Аутори су кроз приказана истраживања развоја реконфигурабилног обрадног система дали значајан допринос проширењу примене робота у вишеосној обради, првенствено кроз развој система управљања отворене архитектуре, на бази генерализованог приступа кинематичког моделовања, и развојем метода *off-line* компензације грешака изазваних статичким силама резања, на бази модела статичке попустљивости робота уз развијени метод за корекцију грешака. Преглед коришћене литературе указује да су резултати аутора монографије у референтној области наишли на изражен пријем у домаћој и међународној научно-стручној заједници, са обзиром на број радова које су аутори објавили у међународним и домаћим часописима и презентовали на међународним и домаћим конференцијама.

Др Милан Зелковић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду

... На основу детаљне анализе свих поглавља публикације, а на основу одредаба „Правилника о поступку, начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача“, предлажем наставно научно већу Машинског факултета да се публикација: „Развој реконфигурабилног обрадног система на бази робота“, аутора Николе Славковића и Зорана Димића прихвати као монографија и да се обзиром да испуњава све критеријуме (значај теме, обим текста по аутору, број референци) Матичном одбору Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије упути предлог за избор у категорију монографија националног значаја.

Др Слободан Табаковић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду