

37. JUPITER KONFERENCIJA

sa međunarodnim učešćem

37th JUPITER CONFERENCE

with foreign participants

**ZBORNIK RADOVA
PROCEEDINGS**



UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Beograd, maj 2011.

Marković, D. PRIMENA INFORMACIONO KOMUNIKACIONIH TEHNOLOGIJA U REALIZACIJI VIRTUELNOG PROJEKTA	1.33
Marković, B. VAZDUHOPLOVSTVO I ODBRAMBENA INDUSTRIJA KREĆU KA IZMENJENIM MEĐUNARODNIM STANDARDIMA	5.6
Mikalački, Ž., Tabaković, S., Zeljković, M., Živković, A. PROJEKTOVANJE ZGLOBNIH PRENOSNIKA PRIMENOM SAVREMENIH PROGRAMSKIH SISTEMA	3.36
Milačić, V. GLOBALNI UNIVERZITET I VELIKA TRKA ZA LJUDSKIM KAPITALOM	UR.37
Milčić, D., Mijajlović, M., Anđelković, B., Đurić, S. RAZVOJ MODULA ZA PRORAČUN ZAVARENIH SPOJEVA	3.53
Milosavljević, A., Polić Radovanović, S., Petronić, S. CAD/CAM TEHNOLOGIJE I PRIMENA SUPERLEGURA U SAVREMENOM DIZAJNU	2.80
Milutinović, D., Glavonjić, M., Tanović, L., Bojanić, P., Puzović, R., Živanović S., Kokotović B., Popović M., Slavković N., Mladenović G. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I RAZVOJA NOVE GENERACIJE OBRADNIH SISTEMA	UR.51
Mitić, M., Miljković, Z., Vuković, N., Lazarević, I. KONCEPCIJSKO REŠENJE UPRAVLJANJA MOBILNOG ROBOTA U DOMENU UNUTRAŠNJEG TRANSPORTA MATERIJALA INTELIGENTNOG TEHNOLOŠKOG SISTEMA	4.23
Mladenović, G. ANALIZA STRATEGIJA OBRADNE KORIŠĆENJEM KOMERCIJALNIH CAD/CAM SOFTVERA	2.63
Mladenović, C., Tabaković, S., Zeljković, M., Gatalo, R. VIRTUELNI MODEL KAO OSNOVA ZA KINEMATSKU ANALIZU MAŠINE ALATKE	3.1
Pejić, V., Petković, Z., Mišić, B. KONCEPT SISTEMA ZA ODREĐIVANJE PARAMETARA REŽIMA REZANJA ZASNOVANOG NA WEB - TEHNOLOGIJAMA.....	3.115
Peković, O., Simonović, A., Stupar, S., Komarov, D. KONSTRUKTIVNO REŠENJE VRHA DIMNJAKA SA KOMPENZACIJOM TERMIČKIH DILATACIJA.....	2.46
Perović, M., Veljić, D. KARAKTERIZACIJA ZAVARENOG SPOJA RAZLIČITIH LEGURA ALUMINIJUMA FORMIRANOG POSTUPCIMA TOPLJENJEM I PLASTIČNOM DEFORMACIJOM.....	3.47
Petrakov, Y. NEW METHOD OF 3-D SIMULATION FOR CAD/CAM SYSTEMS.....	2.1
Petrašinović, N., Petrašinović, D., Posteljnik, Z., Svorcan, J. PRIMENA NAPREDNIH SOFTVERSKIH ALATA ZA RAZVOJ MLINSKOG KOLA OD KONCEPTA DO GOTOVOG PROIZVODA	3.42
Petrović, P., Milanov, M., Vićentić, A., Stojović, M., Spasić, Ž. PRIMENA INELIGENTNIH SENZORSKIH SISTEMA U RAZVOJU INTEGRISANE AUTOMATIZACIJE REALNIH I VIRTUELNIH PROCESA PROIZVODNOG PREDUZEĆA – REKAPITULACIJA REZULTATA NA PROJEKTU MA14035.....	1.17
Petrović, P., Danilov, I., Lukić, N. NOVI PRISTUPI U PROJEKTOVANJU EKSTREMNO VARIJANTNIH PROIZVODA	3.26
Petrović, M., Miljković, Z., Babić, B., Čović, N. VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE I AKSIOMATSKA TEORIJA PROJEKTOVANJA U KONCEPCIJSKOM PROJEKTOVANJU ROBOTIZOVANOG UNUTRAŠNJEG TRANSPORTA MATERIJALA	3.72
Petrović, M., Danilov, I., Lukić, N., Glavonjić, M., Kokotović, B. MEHANISTIČKA IDENTIFIKACIJA MODELA SILE PRI ORTOGONALNOM REZANJU	3.93



ВЕШТАЧКЕ НЕУРОНСКЕ МРЕЖЕ И АКСИОМАТСКА ТЕОРИЈА ПРОЈЕКТОВАЊА У КОНЦЕПЦИЈСКОМ ПРОЈЕКТОВАЊУ РОБОТИЗОВАНОГ УНУТРАШЊЕГ ТРАНСПОРТА МАТЕРИЈАЛА⁵

Резиме

У раду је представљен метод концепцијског пројектовања роботизованог унутрашњег транспорта материјала, базиран на аксиоматској теорији пројектовања и вештачкој интелигенцији. Метод комбинује примену алгоритама за генерисање путања кретања интелигентног мобилног робота и вештачке неуронске мреже за предикцију стања технолошког процеса и машинско учење транспортних путева материјала сходно пројектованим производним процесима. Симулација технолошког процеса, обучавање вештачких неуронских мрежа, као и реализација управљачког кода извршена је у софтверском пакету Matlab. Експериментални резултати на систему мобилног робота Khepera II показују да мобилни робот планира, учи и остварује оптималну путању кретања.

Кључне речи: интелигентни технолошки системи, концепцијско пројектовање, аксиоматска теорија пројектовања, вештачке неуронске мреже, мобилни робот

1. УВОД

Интензиван развој крајем осамдесетих и током деведесетих година 20. века, који је дефинитивно успоставио и нову област истраживања у производном инжењерству - *Интелигентне технолошке системе*, указује на позитиван тренд у правцу остваривања нових производних технологија у 21. веку. У времену када је аутоматизација производње достигла свој максимум, технолошка миграција од флексибилних ка интелигентним технолошким система и задовољавање све већих потреба глобалног тржишта остварује се новим, мултидисциплинарним приступом. Овакав приступ подразумева и примену напредних - интелигентних технологија 21. века, од којих су неке дате у [1].

Почев од средине осамдесетих година, па све до данас, велики број принципа, теорија и методологија пројектовања је предложено и развијано, а њихов преглед и добијени резултати дати су у раду [2]. У домену пројектовања интелигентних технолошких система, теорија и методологија аксиоматског пројектовања широко је саопштavana и објављивана у часопису CIRP Annals, који издаје међународна академија производног машинства. Према резултатима претраживања приказаним у [2], књига из ове области, дата у списку литературе под [3], једна је од најцитиранијих у домену развоја и примене теорије пројектовања у инжењерству. Поред познавања теорије пројектовања, савремен приступ пројектовању интелигентних технолошких система базира се на познавању и примени компјутерски интегрисаних технологија и техника вештачке интелигенције. Истраживање и развој нових генерација интелигентних технолошких система у домену унутрашњег транспорта материјала оријентисано је ка увођењу интелигентних мобилних робота који, захваљујући

¹ **Милица Петровић**, студенткиња докторских студија, Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35, 011/3302-414, e-mail: mmpetrovic@mas.bg.ac.rs

² **Др Зоран Миљковић**, редовни професор, Катедра за производно машинство, Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35, 011/3302-468, e-mail: zmiljkovic@mas.bg.ac.rs

³ **Др Бојан Бабић**, редовни професор, Катедра за производно машинство, Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35, 011/3302-274, e-mail: bbabic@mas.bg.ac.rs

⁴ **Др Небојша Човић**, научни сарадник, Компанија ФМП д.о.о – Београд, Лазаревачки друм 6, 11030 Београд, 011/3052-053, e-mail: nebojsa.covic@fmp.co.rs

⁵ Рад је настао у оквиру истраживања на пројекту „Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима“ (евид. бр. TP-035004) Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије.

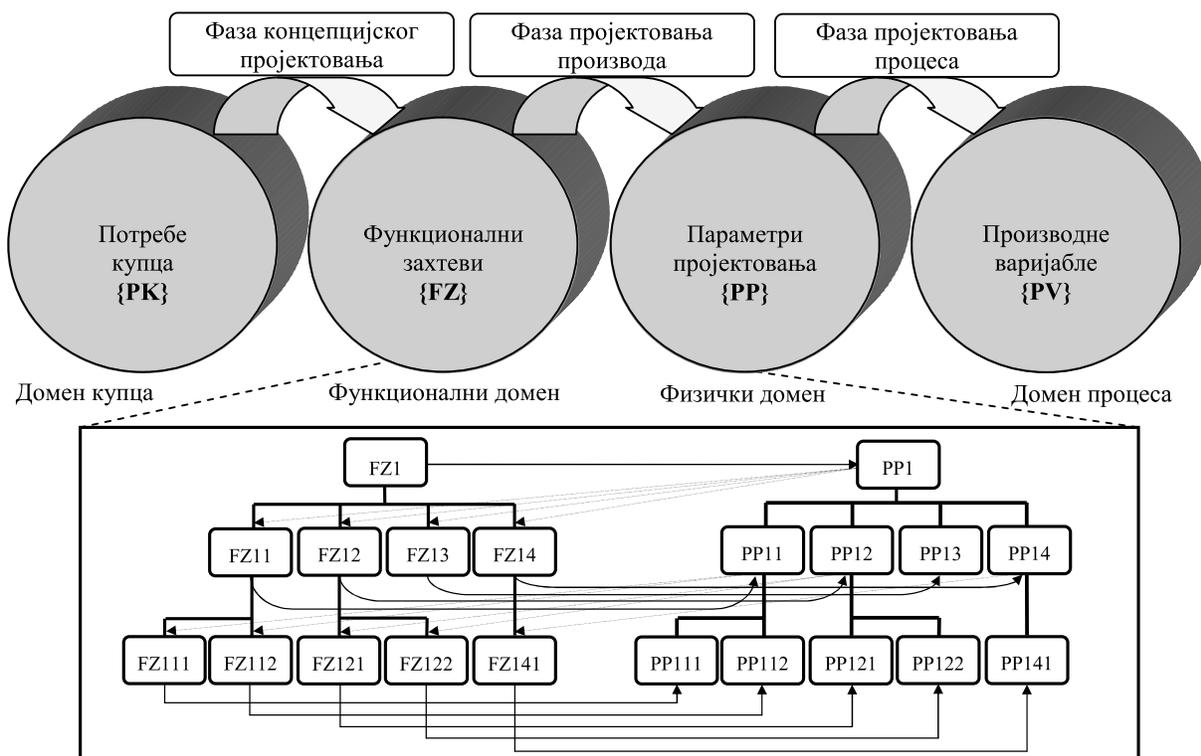
вештачким неуронским мрежама, као једној од парадигми вештачке интелигенције, разумеју технолошки задатак и окружење у којем се налазе. Поред учења транспортних токова у познатим технолошким окружењима, за интелигентан транспорт материјала потребно је решити и проблем управљања кретањем интелигентног агента - мобилног робота. За проблем генерисања и планирања путање кретања мобилног робота у литератури [4] су приказани различити алгоритми претраживања.

Садржај овог рада је организован у шест поглавља. Након уводног поглавља и кратког прегледа истраживања у свакој од тематских целина, у другом поглављу се даје аксиоматски приступ у домену концепцијског пројектовања интелигентног унутрашњег транспорта материјала. Треће поглавље обухвата развој модула за одређивање положаја мобилног робота у расположивом лабораторијском моделу технолошког окружења. Такође, приказани су усвојени и развијени алгоритми за симулацију технолошког процеса и генерисање оптималне путање кретања мобилног робота, као и машинско учење транспортних токова материјала засновано на примени система вештачких неуронских мрежа. У четвртном поглављу су представљени добијени експериментални резултати развијеног концепта на систему мобилног робота *Khepera II* спроведени у лабораторијском моделу технолошког окружења [7]. На крају рада дат је закључак са основним резултатима истраживања и назначеним правцима будућих истраживања.

2. КОНЦЕПЦИЈСКО ПРОЈЕКТОВАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ УНУТРАШЊЕГ ТРАНСПОРТА

Аксиоматска теорија пројектовања представља покушај синтезе основних принципа пројектовања у различитим инжењерским областима [5] и свим фазама пројектовања. Ова методологија пројектовања се заснива на идентификацији потреба купаца и претварању тих потреба у коресподентне функционалне захтеве у физичком домену, а све у циљу развијања минималног скупа захтева који остварују захтеване функције пројектовања. Према [3], пресликавање се постиже кроз процес тзв. мапирања, у фазама концепцијског пројектовања, пројектовања производа и пројектовања процеса. Даље се процес пројектовања остварује кроз итеративно пресликавање и непрекидно преплитање између функционалних захтева (ФЗ) у функционалном домену и параметара пројектовања (ПП) у физичком домену, на сваком од хијерархијских нивоа.

Процес пројектовања система за интелигентни унутрашњи транспорт материјала почиње успостављањем ФЗ у функционалном домену и параметара пројектовања помоћу којих се остварују постављени функционални захтеви у физичком домену. На слици 2.1 приказане су фазе, домени као и хијерархијска структура ФЗ и ПП.



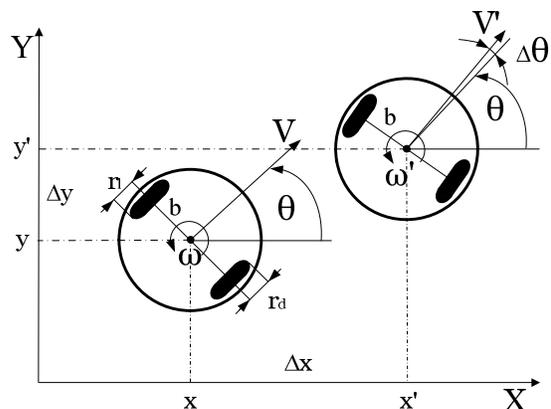
Слика 2.1: Фазе пројектовања, домени и хијерархијска структура ФЗ и ПП

3. МОБИЛНИ РОБОТ У ТЕХНОЛОШКОМ ОКРУЖЕЊУ

3.1 Модул за одређивање положаја мобилног робота

Сходно аксиоматској теорији пројектовања интелигентног унутрашњег транспорта материјала, први функционални захтев (FZ11) на другом хијерархијском нивоу пројектовања подразумева одређивање положаја (позиције и оријентације) мобилног робота, при раванском кретању кроз задато технолошко окружење.

Позиција и оријентација мобилног робота у Декартовом координатном систему, са прираштајима компонената вектора стања, $x_t=(x,y,\theta)$, за два узастопна положаја робота у тренуцима t и t' , где је $t'>t$, приказани су на слици 3.1. Будући да је у питању диференцијални погон точкова мобилног робота (два мотора независно покрећу сваки точак [4]), математичка формулација модела кретања на основу пређеног пута точкова извршена је као у [6]. Поред управљачких величина x , y и θ , на слици 3.1 је приказано и растојање између точкова, означено са b , док су полупречници десног и левог точака означени са r_d и r_l , респективно.



Слика 3.1: Два узастопна положаја мобилног робота у тренуцима t и t'

3.2 Модул за планирање путање кретања мобилног робота

3.2.1 Анализа транспортних токова материјала у производно-монтажном погону

Један од фактора који директно утиче на ефикасност извођења технолошких операција у погонима технолошких система је и уређење производног простора. Према [7], позната су два критеријума за уређење производног простора. У предузећу „МОНТПРОЈЕКТ“, чији је пројектовани *layout* (диспозициони план) [7] искоришћен за лабораторијски модел технолошког окружења, а технолошки процеси као основ за симулацију и планирање путање кретања мобилног робота, примењен је други

критеријум уређења производног простора. То значи да се репроматеријал, обраци и делови кроз технолошки систем крећу секвенцијално истим путем. За анализу производног тока унутар поменутог предузећа, према [5], неопходни су следећи подаци о машинама (напомена: у даљем тексту се увек мисли на машине алатке) и деловима:

- број и опис машина које се користе унутар технолошког система;
- број различитих (репрезентативних) делова који се обрађују;
- величина серије за сваки део;
- технолошка путања за сваки део.

У табели 3.1 приказан је списак машина у разматраном производно-монтажном погону, а у табели 3.2 дат је списак репрезентативних делова који се обрађују на датим машинама. Технолошка путања за сваки део, према [5], одређена је редоследом операција у виду машине потребне за извођење операције и временом трајања операције. Након усвајања података о машинама и деловима, неопходно је успоставити квантитативну зависност између њих. У општем случају, ова зависност се може представити матрицом међузависности M_{DM} [8], која се на основу

Машина	Опис (Тип) машине
M1	Маказе за сечење
M2	CNC машина за пробивање и просецање
M3	CNC хидраулична апкант преса
M4	Машина за исецање профила
M5	Стубна бушилица
M7	Кружна тестера
M8	Оштрилица алата
M9	Линија за обраду делова од бакра

Део	Опис
Део 1	Transport fuse
Део 2	Mainbusbar support
Део 3	Support d800
Део 4	Busbar 2 L1

матрица M (3.1) и D (3.2) дефинише на следећи начин (3.3):

$$M = [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_{NM}] \quad (3.1)$$

$$D = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_{ND}]' \quad (3.2)$$

$$M_{DM} = D \cdot M = \begin{bmatrix} d_1 \\ M \\ d_{ND} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 & L & m_{NM} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$M_{DM} = \begin{bmatrix} p_{11} & L & p_{1j} & L & p_{1NM} \\ M & O & L & L & M \\ p_{i1} & L & p_{ij} & L & p_{iNM} \\ M & L & L & O & M \\ p_{ND1} & L & p_{NDj} & L & p_{NDNM} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$T_{DM} = \begin{bmatrix} t_{11} & L & t_{1j} & L & t_{1NM} \\ M & O & L & L & M \\ t_{i1} & L & t_{ij} & L & t_{iNM} \\ M & L & L & O & M \\ t_{ND1} & L & t_{NDj} & L & t_{NDNM} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & L & r_{1j} & L & r_{1m} \\ M & O & L & L & M \\ r_{i1} & L & r_{ij} & L & r_{im} \\ M & L & L & O & M \\ r_{m1} & L & r_{mj} & L & r_{mm} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

где је: M - вектор машина; D - вектор делова; M_{DM} - квантитативна матрица међузависности; ND - број различитих делова које треба обрадити; NM - број различитих машина у погону; p_{ij} - елемент матрице M_{DM} који има вредност 1 уколико део посећује машину и вредност 0 уколико део не посећује машину.

Ако се у успостављену матрицу међузависности делови-машине M_{DM} уместо параметра p_{ij} замени време трајања операције сваког дела на одговарајућим машинама изражено у секундама, добија се матрица времена T_{DM} , која је приказана са (3.5). У том случају, t_{ij} је елемент матрице T_{DM} који има вредност различиту од 0 уколико део посећује машину и вредност 0 уколико део не посећује машину.

У циљу одређивања оптималне путање кретања мобилног робота, дефинише се и матрица растојања R , која је квадратна матрица формата $(m \times m)$ и дата је схемом (3.6).

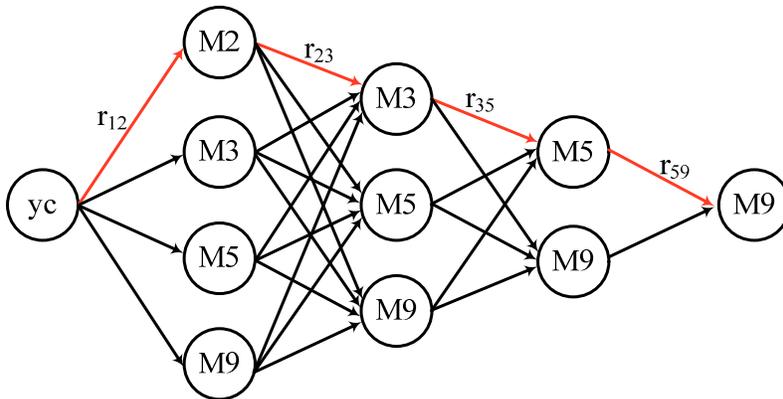
Сходно постулатима који се наводе у теорији графова, а у случају да грана графа повезује један исти чвор, тежински однос те гране је тада једнак нули. На основу тога и својства симетричности, за елементе матрице R важе следеће релације, представљене са (3.7) и (3.8):

$$r_{ij} = r_{ji} \quad (3.7)$$

$$r_{ii} = 0; \ r_{jj} = 0 \quad (3.8)$$

3.2.2 Алгоритми за планирање путање кретања

За задатак планирања путање кретања мобилног робота, који је представљен другим функционалним захтевом (FZ12) на другом хијерархијском нивоу, развијена су три алгоритма. Први је A^* алгоритам претраживања, који је коришћен за проналажење најкраће путање између почетне и циљне тачке у одређеном окружењу [6]. Настаје као резултат синергијског дејства два алгоритма - *Dijkstra* и *best-first search* алгоритма, при чему сваки од њих користи различите критеријуме претраживања. *Dijkstra* алгоритам врши претраживање сходно критеријуму најкраћег пута и на основу њега дефинисане цене помераја, док *best-first search* алгоритам користи хеуристички прихватљиве процене за естимацију вредности цене помераја. Развој A^* алгоритма је дат је у [3], а имплементација у [6].

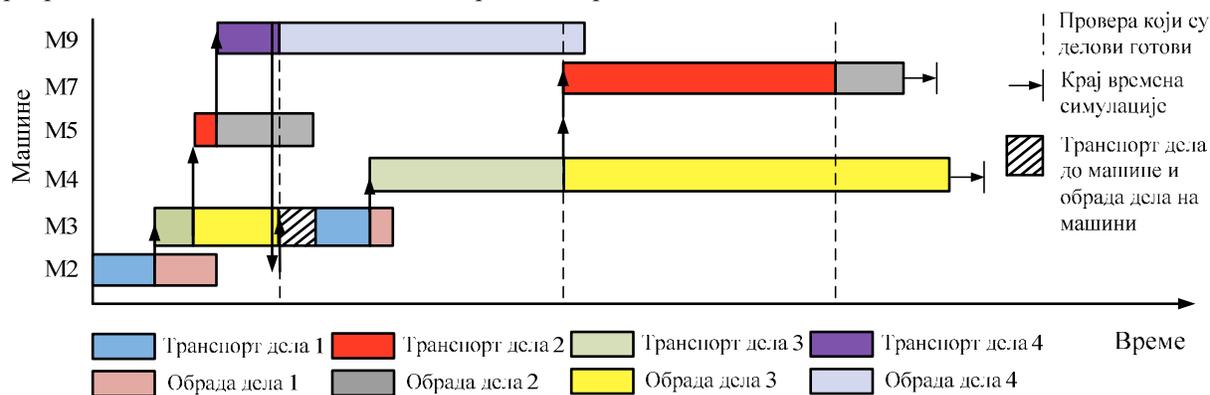


Слика 3.2: Графички приказ и резултат претраживања другог алгоритма

Други алгоритам (слика 3.2) се користи за одређивање редоследа машина по приоритету које робот посећује при транспорту четири репрезентативна дела на машине за прву операцију. На основу матрице делови-машине (M_{DM}), познате су машине (чворови графа) на којима се обавља прва операција сваког од репрезентативних делова. Одабир чворова врши се на сваком нивоу графа алгоритма, на основу минималног растојања као критеријума.

Овај алгоритам, такође, припада групи *breadth-first search* алгоритма, што значи да се у сваком кораку алгоритма врши претраживање чворова који припадају истом нивоу.

Алгоритам за одређивање редоследа чворова по приоритету при планирању путање кретања мобилног робота сходно технолошком поступку представља трећи развијени алгоритам. Овај алгоритам генерише карактеристичне временске параметре технолошког процеса (трајање операције на машини) и временске параметре везане за транспорт делова до машина (време кретања мобилног робота између машина). На слици 3.3 дат је упоредни приказ времена транспорта сваког од репрезентативних делова до машина и времена обраде делова на машинама.



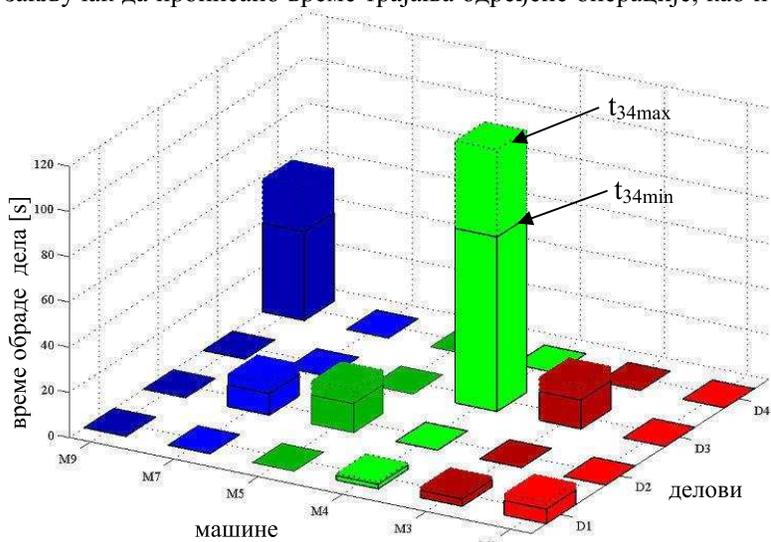
Слика 3.3: Графички приказ времена транспорта и обраде за четири репрезентативна дела

После транспорта последњег репрезентативног дела на машину за прву операцију, од свих машина на којима су до тог тренутка делови готови, алгоритам бира ону машину до које је растојање од тренутног чвора минимално тј. бира најкраће растојање између тренутне позиције робота и машине на којој је предвиђена технолошка операција завршена. У примеру на слици 3.3 је то део 1 на машини M2. Након кретања робота до изабране машине (M2), преузимања готовог дела (део 1) и његовог транспорта на M3, на основу матрице зависности делови-машине (M_{DM}) се одређује на којој се машини обавља следећа операција дела (део 3) који је готов на M3 и сходно томе одређује следећи циљни чвор. Тада мобилни робот врши транспорт преузетог дела (део 3) од тренутног стартног чвора (M3) до циљног чвора (M4). Ова процедура се понавља до жељеног временског трајања симулације.

3.3 Модул за предикцију параметара технолошког процеса

Познато је да инжењерски процеси углавном нису детерминистичке природе. Процеси који су значајни за постављени задатак транспорта материјала са аспекта времена трајања јесу обрадни процес и процес кретања робота између дефинисаних чворова (машина). С обзиром на то да су ови процеси стохастичке природе, следи закључак да прописано време трајања одређене операције, као и време транспорта делова роботом од чвора до чвора није једнако за сваки део из групе истих репрезентативних делова.

На пример, време трајања прве технолошке операције за део 1 налази се у интервалу $8s \pm t_{12}$, где је t_{12} толеранција времена трајања прве операције, док се време кретања робота при транспорту дела 3 од M3 до M4 налази у интервалу $10s \pm t_{334}$, при чему је t_{334} толеранција за време кретања робота. На слици 3.4 дат је графички приказ времена трајања технолошких операција делова на машинама, са јасно назначеним горњим и доњим



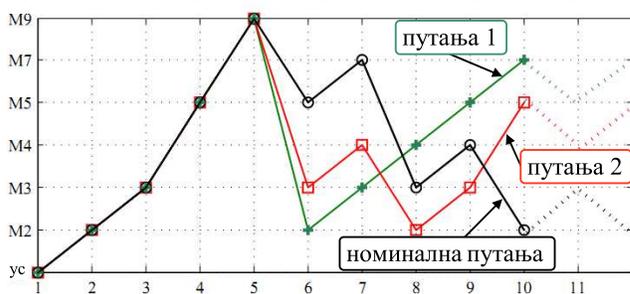
Слика 3.4: Графички приказ времена обраде делова

границама временских интервала генерисаних униформном расподелом. На основу овако извршене предикције временских параметара, сходно функционалном захтеву FZ13, јасно је да редослед чворова у генерисаној путањи зависи од времена кретања робота између чворова R_T (добива се експерименталним путем или на основу матрице растојања R) и времена трајања технолошких операција на машинама (T_{DM}).

3.4 Модул за учење транспортних токова материјала

Примена система вештачких неуронских мрежа (ВНМ) за решавање проблема у различитим областима производног инжењерства је веома широка и датира још од деведесетих година 20. века. Према [9] издвајају се три основне категорије њихове употребе: класификација, предикција и функционална апроксимација. За задатак учења транспортних токова материјала, исказан и функционалним захтевом FZ14, користи се друга категорија употребе ВНМ - предикција. На основу претходних вредности стања система (у конкретном случају временских параметара процеса и времена кретања робота између машина) и тренутних вредности стања система (чвор у ком се робот тренутно налази), врши се предикција наредног чвора путање у који се транспортује део, слика 3.5.

План експеримента за прикупљање 30 парова за обучавање вештачких неуронских мрежа састојао се у варирању толеранције t у границама $\pm 25\%$ и добијању различитих временских параметара од којих зависи редослед чворова у путањи.



Слика 3.5: Предикција различитих путања кретања мобилног робота у зависности од временских параметара процеса

Matlab Neural Network Toolbox, са Левенберг-Маркеовим алгоритмом учења [9] и сигмоидном активационом функцијом. Може се уочити да је најбоље резултате показала мрежа са четири неурона у једном скривеном слоју и параметром учења $\eta=0,05$. Грешка учења износила је $1 \cdot 10^{-13}$.

ВНМ, на основу временских параметара добијених симулацијом, процесирају информације о технолошком процесу и генеришу чвор у који робот прелази. На тај начин, сваки члан матрица T_{DM} и R_T утиче на планирање путање и одабир сваког наредног чвора. С тим у вези треба напоменути да се не генерише једна путања коју робот прати, већ номинална путања бива абдејтована на основу симулираних података о стању процеса и времена кретања робота, слика 3.5.

За обучавање ВНМ коришћен је

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

4.1 Експеримент 1: Праћење генерисане путање кретања

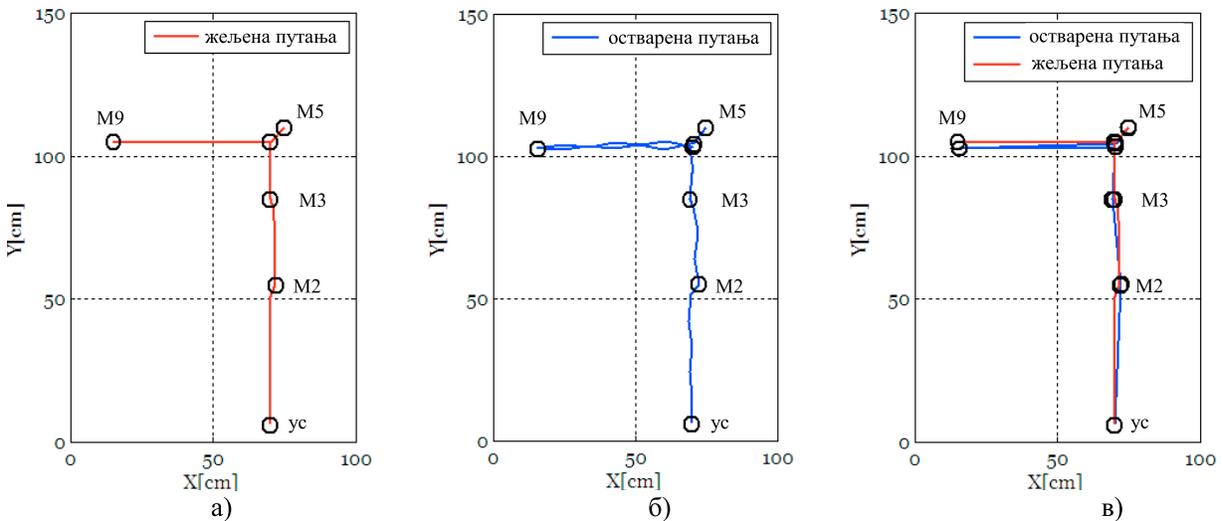
За задатак праћења путање, одабран је део номиналне путање кретања генерисане на основу параметара технолошког процеса. Усвојен почетни положај робота је $x_p=[70 \ 6 \ 90]$, што одговара координатама чвора 1, односно, координатама улазног складишта полуфабриката - лима (ус), док су координате циљне тачке $x_c=[75 \ 110]$, што одговара координатама чвора 7, односно координатама позиције у којој се мобилни робот налази при опслуживању стубне бушилице (M5). Координате свих чворова (машина алатки и складишта) дати су у табели 4.1. Ознака сгдл представља складиште готових делова од лима, мс међускладиште, док сгдб представља складиште готових делова од бабра.

Табела 4.1: Координате чворова у лабораторијском моделу технолошког окружења

ознака чвора	ус	M2	M3	M4	M5	M7	M9	сгдл	мс	сгдб
број чвора	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x[cm]	70	72	70	75	70	75	15	30	50	20
y[cm]	6	55	85	40	105	110	105	105	100	105

Брзине левог и десног точка *Khepera II* мобилног робота током кретања кроз технолошко окружење биле су једнаке и износиле су $V_l=V_d=20$ [mm/s]. На слици 4.1 дат је упоредни приказ

жељене (слика 4.1 (а)), остварене (слика 4.1 (б)), као и жељене и остварене (слика 4.1 (в)) путање кретања мобилног робота. Са слике је очигледно да се жељена и остварена номинална путања кретања разликују, па се тачност позиционирања може интерпретирати преко параметара MSE и $RMSE$ [9]. Средња квадратна грешка (MSE) позиционирања по x координати износи 0,5598 [cm], а по y координати 1,4624 [cm], док је корен средње квадратне грешке ($RMSE$) по x координати је 0,7482 [cm], а по y координати 1,2093 [cm].

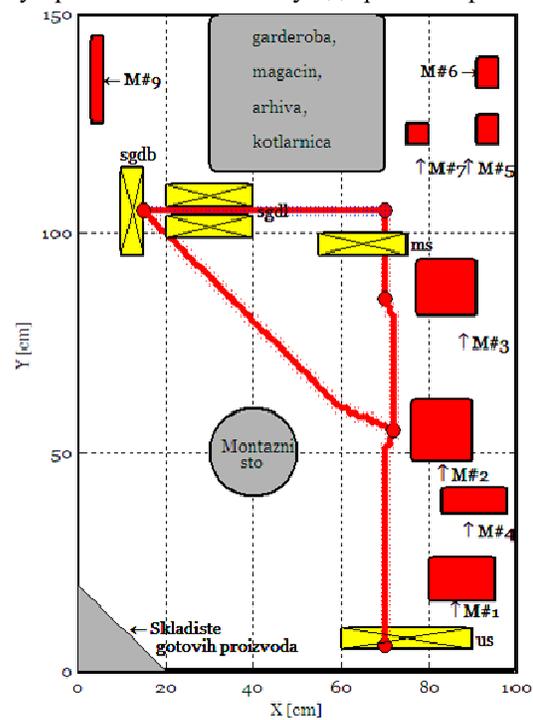


Слика 4.1: Упоредни приказ жељене и остварене путање кретања робота за експеримент 1

4.2 Експеримент 2: Праћење путање генерисане као резултат машинског учења мобилног робота применом ВНМ

Као и у првом експерименту, почетни положај робота је $x_p = [70 \ 6 \ 90]$, што одговара координатама чвора 1, односно, координатама улазног складишта полуфабриката од лима (ус), док координате циљне тачке биле x_c нису биле познате на самом почетку кретања и зависиле су од времена кретања робота између машина и времена обраде делова на машинама. Брзине левог и десног точка мобилног робота током кретања кроз технолошко окружење биле су једнаке и износиле су $V_l = V_d = 30$ [mm/s]. Робот се креће до позиција у којима оставља репрезентативне делове на машине за прву операцију (M2, M3, M5 и M9), као што је приказано жељеном путањом на слици 4.1(a). Истовремено се на основу алгоритма који симулира технолошки процес генеришу карактеристична времена обраде делова на машинама.

Када се робот након транспорта последњег репрезентативног дела на машину за прву операцију нађе у чвору 7 (M9), подаци о тренутном положају и времену се обрађују ВНМ. На основу тренутног чвора и експериментом добијеног времена трајања кретања робота, ВНМ дају најближу машину на којој је завршена технолошка операција и тако генеришу информацију о следећој акцији робота. Тада се он креће према наредном чвору (чвор 2 – M2), слика 4.2. Сада чвор 2 постаје тренутни, а време кретања робота од чвора 7 до чвора 2 меродавно за предикцију наредног чвора. Као и у претходном случају, ВНМ дају команду да се из чвора 2 робот креће у чвор 3 оптималном путањом генерисаном A^* алгоритмом, која је на слици приказана линијом црвене боје.



Слика 4.2: Приказ кретања мобилног робота у лабораторијском моделу технолошког окружења

5. ЗАКЉУЧАК

У оквиру овог рада представљен је метод концепцијског пројектовања роботизованог унутрашњег транспорта материјала у интелигентном технолошком систему. Интелигентни мобилни робот, при *a priori* познатим статичким препрекама у окружењу, има способност да генерише оптималну путању кретања у складу са захтевима технолошког процеса и приоритетом опслуживања машина алатки, као и да на основу претходних акција, захваљујући вештачким неуронским мрежама, учи оптималне транспортне путеве и редослед задатака манипулације. У раду су приказани развијени и имплементирани алгоритми, и то *breadth-first search* класа алгоритама за генерисање карактеристичних чворова дискретизованог технолошког окружења, и A^* алгоритам за одабир оптималне путање кретања између њих. На бази вештачких неуронских мрежа развијен је подсистем за предикцију параметара технолошког процеса и учење карактеристичних временских параметара процеса. За потребе симулације извршена је оцена временских норматива технолошког процеса, а прописане временске норме су моделиране сагласно законима униформне расподеле. Алгоритми претраживања и модели вештачких неуронских мрежа су развијени у *Matlab* софтверу и имплементирани на мобилном роботу *Khepera II*, уз експериментална тестирања и верификацију рада у реалном времену у лабораторијском моделу технолошког окружења. Како је остварена средња квадратна грешка (*MSE*) позиционирања робота по *x* координати 0,5598 [cm], а по *y* координати 1,4624 [cm], правци даљих истраживања односили би се на развијање алгоритама локализације мобилног робота, базираних на обради сензорских информација са камере.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Teti, R., Kumara, S.R.T., **Intelligent Computing Methods for Manufacturing Systems**, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 46, Issue 2, pp. 629-652, 1997.
- [2] Tomiyama, T., Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, Ch., Kimura, F., **Design methodologies: Industrial and educational applications**, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 58, pp. 543–565, 2009.
- [3] Suh, N.P., **The Principles of Design**, Oxford University Press, 1990.
- [4] Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., **Introduction to Autonomous Mobile Robots**, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2004.
- [5] Бабић, Б., **Пројектовање технолошких процеса**, II издање, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2004.
- [6] Петровић, М., Лукић Н., Вуковић Н., Миљковић З., **Мобилни робот у унутрашњем транспорту материјала интелигентног технолошког система - едукација и развој**, 36. ЈУПИТЕР Конференција, 32. симпозијум НУ*РОБОТИ*ФТС, Зборник радова стр. 3.85-3.90, Београд, 2010.
- [7] Миљковић З., Милановић Д., Нешић Н., Стошић Д., Милановић С., **Пројектовање производних процеса у предузећу „Монтпројект“ - Београд**, Технолошко-развојни пројекат, 2004.
- [8] Miljković, Z., Babić, B., **Machine-Part Family Formation by Using ART-1 Simulator and FLEXY**, *FME Transactions* (ISSN 1451-2092), New Series, Vol. 33 No. 3, pp. 157-162, University of Belgrade – Faculty of Mechanical Engineering, 2005.
- [9] Миљковић З., Александрић Д., **Вештачке неуронске мреже – Збирка решених задатака са изводима из теорије**, Универзитет у Београду – Машински факултет, 2009.

ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AND AXIOMATIC DESIGN THEORY IN CONCEPTUAL DESIGN OF INTELLIGENT MATERIAL TRANSPORT

Abstract

This paper presents a method for conceptual design of material transport using mobile robot, based on axiomatic design theory and artificial intelligence. The method combines the use of algorithms to generate motion path of intelligent mobile robot as well as artificial neural networks for prediction of the manufacturing process and machine learning of material transport routes that are designed according to proposed production processes. Simulation of manufacturing processes, artificial neural networks training and implementation of algorithms is executed in Matlab software package. Experimental results on a system of Khepera II mobile robot show that mobile robot can plane, learn and make the optimal path.

Keywords: intelligent manufacturing systems, conceptual design, axiomatic design theory, artificial neural networks, mobile robot