

Милица Петровић¹, Никола Лукић², Најдан Вуковић³, Зоран Миљковић⁴

МОБИЛНИ РОБОТ У УНУТРАШЊЕМ ТРАНСПОРТУ МАТЕРИЈАЛА ИНТЕЛИГЕНТНОГ ТЕХНОЛОШКОГ СИСТЕМА - ЕДУКАЦИЈА И РАЗВОЈ

Резиме

У раду је представљено предложено концепцијско пројектно решење за унутрашњи транспорт материјала интелигентним мобилним роботом у постојећем производном окружењу. У односу на досадашњи конвенционални тип транспорта, претпоставља се да би применом овог решења било постигнуто повећање степена корисности технолошког система. Резултати показују да би у циљу повећања ефикасности при обављању транспортних задатака било оправдано применити предложени концепт базиран на вештачкој интелигенцији, уз наглашавање одређених ограничења.

Кључне речи: интелигентни мобилни робот, унутрашњи транспорт, вештачка интелигенција

1. УВОД

Захтев за повећањем продуктивности и флексибилности производње довео је до убрзаног развоја производних технологија и потребе за применом интелигентних технолошких система (ИТС) [3]. Услед комплексности оваквих система неопходан је мултидисциплинарни приступ у њиховом истраживању, као и при образовању производних инжењера у том правцу. У овом раду је приказано концепцијско пројектно решење и остварени експериментални резултати током израде пројекта на предмету *Интелигентни технолошки системи*, на другој години Дипломских академских студија. Студентским пројектним задатком је, на бази мултидисциплинарног приступа, анализирана могућност унапређења унутрашњег транспорта репроматеријала, обрадака и готових делова унутар постојећег технолошког система [9]. Разматрано је да ли би увођење интелигентног мобилног робота, уместо виљушкарка као транспортног средства, резултирало повећањем ефикасности у обављању транспортних задатака. Решавање пројектног задатка извршено је у оквиру лабораторијског модела технолошког окружења фабрике *Siemens AG* електро-ормана [9], коришћењем едукационог мобилног робота *LEGO Mindstorm NXT* [7]. Алгоритам за управљање одговарајућег кретања мобилног робота развијен је у софтверском окружењу *MATLAB*-а [8], уз примену функција *RWTH Toolbox*-а [6].

Предикција и корекција положаја (позиције и оријентације) мобилног робота остварена је применом алгоритма Калмановог филтра на основу имплементираних модела кретања и перцепције. Корак корекције следи након препознавања маркера црне боје који представљају „референтне тачке“. Аквизицијом и обрадом сигнала са оптичких сензора, помоћу вештачких неуронских мрежа (ВНМ), врши се препознавање референтних тачака и одређивање управљачке команде за промену оријентације мобилног робота. Оптималну путању, од почетног до циљног чвора, генерише A^* алгоритам, уз претходну дискретизацију дефинисаног радног простора одговарајућим бројем

¹ Милица Петровић, студент друге године Дипломских академских студија, Катедра за производно машинство, Универзитет у Београду - Машински факултет, milicapetrovic351@yahoo.com

² Никола Лукић, студент друге године Дипломских академских студија, Катедра за производно машинство, Универзитет у Београду - Машински факултет, lukic2205@yahoo.com

³ Најдан Вуковић, дипл. маш. инж, Студент докторских студија, Иновациони центар Машинског факултета у Београду, nvukovic@mas.bg.ac.rs

⁴ Др Зоран Миљковић, ванредни професор, Катедра за производно машинство, Универзитет у Београду - Машински факултет, zmiljkovic@mas.bg.ac.rs

пиксела. Применом предложеног концепцијског решења, при обављању постављеног транспортног задатка мобилним роботом, успешност реализације износи 70% и то без примене комплексног модула за избегавање препрека.

Концепцијско решење студентског пројектног задатка дато је у другом делу рада. У трећем делу овог рада су дефинисане теоријске основе, примењене за решавање постављеног проблема. Експериментални резултати и анализа дати су у четвртном делу, уз закључак на крају рада.

2. УПРАВЉАЧКИ АЛГОРИТАМ – КОНЦЕПЦИЈСКО РЕШЕЊЕ

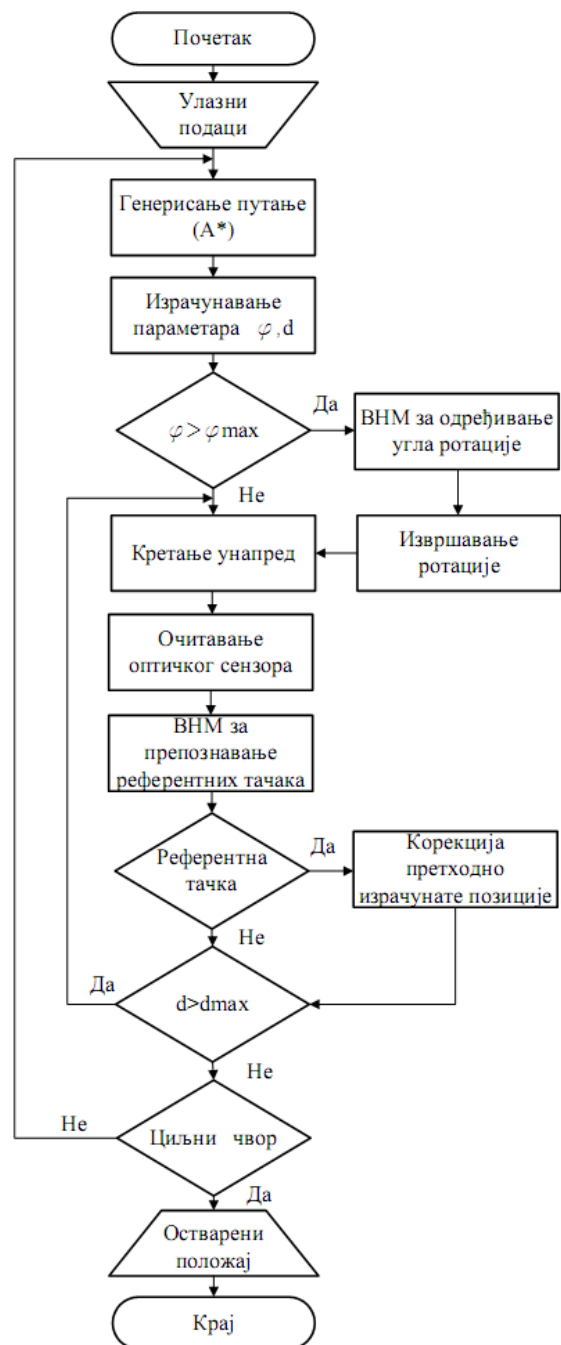
Концепцијско решење предметног студентског пројектног задатка је приказано алгоритмом на слици 2.1. Дати алгоритам представља ток информација унутар главног управљачког кода реализованог у MATLAB софтверском пакету. Његовим извршавањем остварује се кретање мобилног робота у датом радном простору лабораторијског модела технолошког окружења, у реалном времену.

На почетку је неопходно да се дефинишу улазни подаци који представљају: конструкционе карактеристике мобилног робота (растојање између тачкова и полупречник тачкова), координате референтних тачака које су одређене на основу стеченог искуства током спровођења експеримената, координате почетног и крајњег чвора, дозвољену грешку при позиционирању мобилног робота (d_{max}) и дозвољену угаону грешку између тренутног правца кретања и правца ка наредном чвору (φ_{max}).

Оптимална путања кретања се одређује применом A^* алгоритма. На основу тренутног положаја робота и наредног чвора израчунава се растојање (d) и угао између тренутног и наредног правца, уз одређивање смера кретања (φ). Уколико је испуњен услов $\varphi > \varphi_{max}$, прво се извршава ротација на основу угла добијеног из обучене вештачке неуронске мреже, а затим кретање унапред (слика 2.1). Ако услов није испуњен, одмах се извршава кретање унапред до наредног чвора, уз читавање вредности са оптичког сензора. Очитане вредности процесира вештачка неуронска мрежа (машинско учење - обучавање ВНМ) на чијем се излазу добија информација да ли је референтна тачка препозната. Када је то случај, извршава се корекција претходно израчунатог положаја применом алгоритма Калмановог филтра. Тада се тренутне координате робота ажурирају координатама референтне тачке, на основу разлике између предвиђене и стварне позиције препознате референтне тачке. Кретање унапред извршава се за одређени инкремент све док је испуњен услов $d > d_{max}$, односно док се не достигне наредни чвор.

Уколико достигнути чвор није циљни, претходно описана процедура се понавља. Када је поменути услов испуњен мобилни робот се зауставља, а као излаз се добија остварени положај у глобалном координатном систему.

Детаљанији опис имплементације модела кретања, Калмановог филтра, вештачких неуронских мрежа и A^* алгоритма, дат је у делу рада који следи.

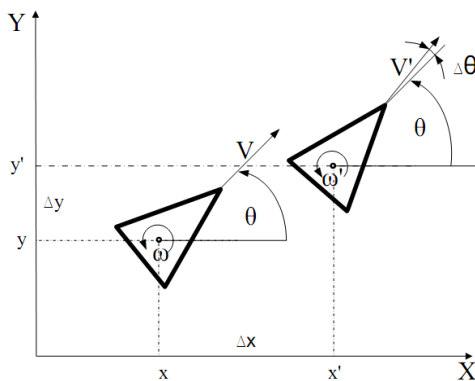


Слика 2.1: Управљачки алгоритам кретања мобилног робота

3. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ПРИМЕЊЕНИХ РЕШЕЊА

3.1 Модел кретања мобилног робота

Положај мобилног робота, при раванском кретању кроз задато технолошко окружење, одређен је вектором стања система $x_t=(x, y, \theta)$, где x и y представљају компоненте вектора које дефинишу позицију, док θ представља угао оријентације мобилног робота, мерен у односу на X-осу (слика 3.1). Позиција и оријентација мобилног робота у Декартовом координатном систему, са прираштајима компонената вектора стања, за два узастопна положаја робота у тренуцима t и t' , где је $t' > t$, приказани су на слици 3.1, при чему је мобилни робот представљен једнакокраним троуглом.



Математичка формулација модела кретања мобилног робота на основу пређеног пута тачкова је:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta s \cos(\theta + \Delta\theta/2) \\ \Delta s \sin(\theta + \Delta\theta/2) \\ \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

где x' , y' и θ' представљају компоненте вектора стања у тренутку t' ; x , y и θ компоненте у тренутку t ; Δs прираштај лучне координате и $\Delta\theta$ прираштај угла ротације.

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

3.2 Естимација положаја мобилног робота

Локализација представља проблем одређивања положаја мобилног робота у радном окружењу на основу сензорских информација. Проблем локализације може бити схваћен као координатна трансформација из покретног координатног система везаног за мобилни робот у непокретни спољашњи координатни систем. Међутим, због стохастичке природе процеса, ову трансформацију није могуће директно спровести, па је неопходно применити методе теорије естимације. У том смислу, једначина стања система и једначина мерења представљене су следећим изразима:

$$x_{t'} = A_t x_t + B_t u_t + w_t \quad ; \quad z_t = C_t x_t + v_t \quad (2)$$

где су: x_t вектор стања система у тренутку t' ; A_t матрица система; x_t вектор стања система у тренутку t ; B_t матрица која успоставља везу између управљања и тренутног стања; u_t вектор управљања помоћу ког се дефинише како систем прелази из стања x_t у стање $x_{t'}$; w_t шум система; z_t вектор мерења у тренутку t ; C_t матрица која успоставља везу између тренутног стања и тренутног мерења и v_t шум мерења.

Претпоставимо да вектор стања система x подлеже Гаусовој расподели са очекиваном вредношћу μ и матрицом коваријанси Σ , $p(x) \sim N(\mu, \Sigma)$. Нека и шумови w_t и v_t такође подлежу Гаусовој расподели, али са нултим очекиваним вредностима и матрицама коваријанси R и Q , респективно, тј. $p(w_t) \sim N(0, R)$ и $p(v_t) \sim N(0, Q)$. Узимајући ово у обзир, естимација вектора стања система на основу једначина (2) може бити спроведена применом алгоритма Калмановог филтра [5], који је приказан у табели 3.1.

Величине дате у табели 3.1 су: μ_t и Σ_t очекивана вредност и коваријанса вектора стања система у тренутку t , u_t вектор управљања у тренутку t' , z_t вектор мерења у тренутку t' , $\mu_{t'}$ и $\Sigma_{t'}$ очекивана вредност и коваријанса вектора стања система у тренутку t' , а $g(\cdot)$ и $h(\cdot)$ су нелинеарне функције стања система и мерења, респективно. Јакобијан матрица G_t у алгоритму представља промену функције модела кретања у односу на положај робота, док Јакобијан матрица H_t

Табела 3.1: Алгоритам линеаризованог Калмановог филтра		
1.	Улазне величине: $\mu_t, \Sigma_t, u_t, z_t$	предикција
2.	$\bar{\mu}_{t'} = g(u_t, \mu_t)$	
3.	$\bar{\Sigma}_{t'} = G_t \Sigma_t G_t^T + R_{t'}$	
4.	$K_{t'} = \bar{\Sigma}_{t'} H_{t'}^T (H_{t'} \bar{\Sigma}_{t'} H_{t'}^T + Q_{t'})^{-1}$	корекција
5.	$\mu_{t'} = \bar{\mu}_{t'} + K_{t'} (z_{t'} - h_t(\bar{\mu}_{t'}))$	
6.	$\Sigma_{t'} = (I - K_{t'} H_{t'}) \bar{\Sigma}_{t'}$	
7.	Изразне величине: $\mu_{t'}, \Sigma_{t'}$	

представља промену мерења услед промене координата положаја мобилног робота. Калманов филтар представља линеарни регулатор, који поседује појачања која минимизирају варијансу грешке.

3.3 Машинско учење мобилног робота помоћу вештачких неуронских мрежа

Вештачке неуронске мреже представљају универзалне апроксиматоре са могућношћу нелинеарног раздвајања. Захваљујући учењу пресликавања између улазног и излазног простора, вештачке неуронске мреже имају способност адаптивног понашања према променама [1]. Ове карактеристике омогућавају да се оне примене за решавање различитих инжењерских проблема из домена производних технологија.

Због изразитих нелинеарности и несавршености у погонским и сензорским подсистемима коришћеног LEGO мобилног робота, у овом раду су вештачке неуронске мреже примењене за моделирање следећих проблема:

- одређивање угла ротације вратила мотора у односу на потребну оријентацију мобилног робота у глобалном координатном систему, и
- препознавање референтних тачака у радном окружењу мобилног робота на основу читавања оптичког сензора.

У првом случају успостављање математичког модела за одређивање угла ротације вратила мотора подразумева одређивање комплексних узрочно-последичних релација чија примена у реалном времену негарантује захтеване перформансе. Чак и имплементирани математички модел не би генерисао очекиване резултате за задату номиналну команду зато што не би узимао у обзир трење у погонском модулу, као ни стохастичку природу процеса.

Да би развили адекватан неуронски модел, формиран је скуп обучавајућих парова који чине релативни углови промене оријентације мобилног робота као улазне величине и потребне команде за ротацију вратила мотора као излазне величине. У циљу обучавања ВНМ коришћен је MATLAB Neural Network Toolbox, са Левенберг-Маркеовим алгоритмом учења [2] и сигмоидном активационом функцијом. Најбоље резултате показала је мрежа са осам неурона у првом, шест неурона у другом скривеном слоју и параметром учења $\eta = 0,05$. Грешка учења износила је $2,35 \cdot 10^{-12}$.

У другом случају вештачка неуронска мрежа је коришћена за апроксимацију утицаја промене температуре и интензитета осветљења у окружењу, кроз учење остварено преко информација добијених од оптичког сензора. На овај начин је обезбеђено препознавање одговарајуће боје референтне тачке.

Улазни скуп формиран је нормализацијом резултата мерења оптичког сензора у оквиру интервала $[-1,1]$, а излазни скуп је дат вредностима -1 за црну боју и 1 за белу боју. Алгоритам учења, активациона функција и параметар учења исти су као и за прву мрежу, а најбоље резултате показала је мрежа са два неурона у једном скривеном слоју. Грешка учења износила је $6,21 \cdot 10^{-9}$.

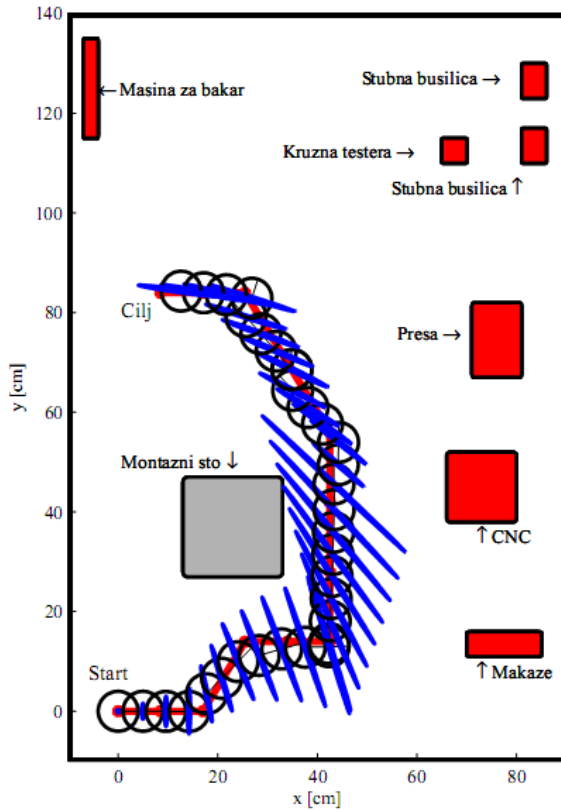
3.4 Одређивање оптималне путање кретања мобилног робота

A^* је алгоритам претраживања који проналази најкраћу путању између почетне и циљне тачке у одређеном окружењу [4]. Користећи хеуристички прихватљиве процене, алгоритам поступно „пролази кроз задато технолошко окружење“ бирајући оптималну путању, у смислу најкраћег пређеног пута. Окружење је неопходно дискретизовати и дефинисати на начин који ће омогућити да се у обзир узму ограничења унутар задатог окружења.

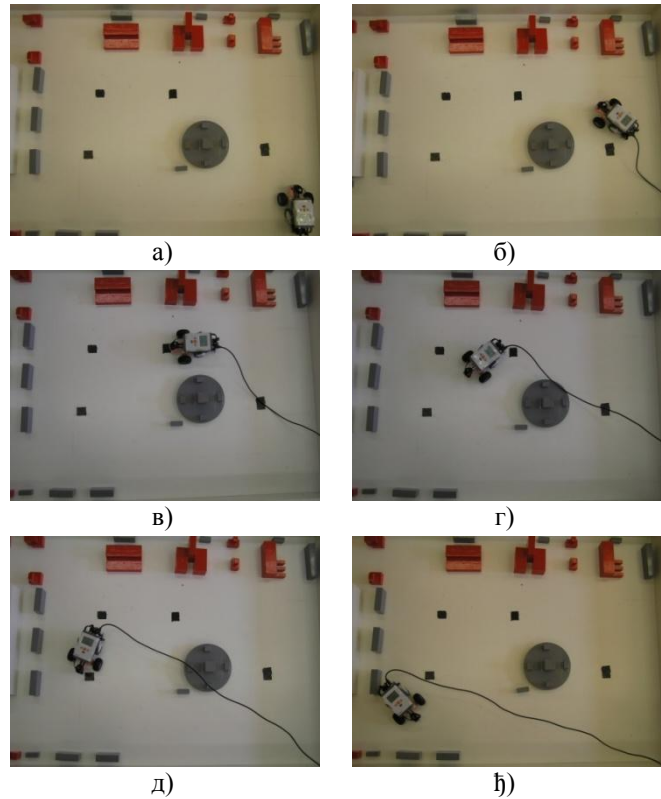
Одабир оптималне путање врши се помоћу основних параметара, према изразу $f(n)=h(n)+g(n)$, где су: n број чвора; h процена најкраћег пута дефинисаног Еуклидском нормом од задатог циљног до посматраног чвора дискретизованог окружења и g цена помераја, која практично представља пређени пут између два суседна чвора. Поред основних параметара, дефинишу се и препреке унутар технолошког окружења и укупни пређени пут који представља збир свих парцијалних цена помераја g у току одабира оптималне путање. На основу наведених параметара, израчунава се оцена најкраћег пута, од стартног до циљног чвора. Израчунавањем и избором минималне вредности параметра f за све суседне чворове, у односу на чвор у којем се тренутно налази, A^* алгоритам бира следећи чвор. Претходно дефинисана процедура се понавља све док се не достигне циљни чвор, тако да се на тај начин генерише оптимална путања која представља низ одабраних чворова. У конкретном случају, овај алгоритам је коришћен за генерисање оптималне путање кретања мобилног робота унутар лабораторијског модела технолошког окружења, узимајући при томе у обзир пројектовани диспозициони план распореда машина алатки, монтажних станица и складишта [9].

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

На слици 4.1 дат је графички приказ, генерисан у MATLAB-у за време кретања мобилног робота од старта до циљног чвора, према описаном управљачком алгоритму (слика 2.1). Робот је представљен црним кругом, несигурност доласка робота у одговарајућу позицију плавом елипсом, а путања коју генерише A* црвеном линијом. Такође, дат је распоред машина, као и границе технолошког окружења. Сликаом 4.2 (а-ђ) приказани су остварени положаји мобилног робота током кретања у лабораторијском моделу технолошког окружења. Након препознавања референтне тачке (слика 4.2 (в)), робот извршава корекцију положаја, што се манифестује смањењем елипсе (слика 4.1).



Слика 4.1: Графички приказ кретања мобилног робота



Слика 4.2: Кретање мобилног робота у лабораторијском моделу технолошког окружења

У циљу верификације предложеног концепта за унутрашњи транспорт материјала интелигентним мобилним роботом извршени су експерименти. Почетни положај робота био је $x_p=[0 \ 0 \ 0]$, а координате циљне тачке $x_c=[8,5 \ 84]$. Од десет експеримената, успешно је извршено седам. У неуспешне експерименте класификују се они код којих се догодила колизија робота са објектима и/или са границама окружења. На слици 4.1 је приказан један од седам успешних покушаја. Израчунате и остварене координате положаја мобилног робота дате су у табели 4.1.

На основу приказаних резултата уочено је да се међусобно разликују задате, израчунате и физички остварене координате положаја робота. Дозвољена грешка, израчуната у односу на задате координате, у овом експерименту је била $d_{max}=5[cm]$. Средња вредност грешака, остварених координата у односу на задате, износи $\Delta x=10,286 [cm]$ и $\Delta y=9,286 [cm]$.

Табела 4.1: Упоредни приказ експерименталних резултата							
Бр. експ.	Израчунато			Остварено			Препозната референтна тачка
	x[cm]	y[cm]	$\theta[^\circ]$	x[cm]	y[cm]	$\theta[^\circ]$	
1.	9,515	84,467	176,4	19,5	97,5	170	-
2.	9,364	81,459	108,27	9,5	93	95	-
3.	11,601	81,962	133,38	15,5	94	105	#2
4.	Неуспешно (колизија са монтажним столом)						-
5.	11,104	84,643	177,37	11	91,5	175	#4
6.	Неуспешно (колизија са машином алатком)						-
7.	13,434	84,597	163,57	28	93	135	-
8.	12,825	84,692	176,4	35	97,5	150	-
9.	13,404	83,076	161,66	13	86,5	175	#4
10.	Неуспешно (колизија са монтажним столом)						-

У табели се, такође, може видети да ли је и која од четири дефинисане референтне тачке уочена и препозната током кретања мобилног робота. Евидентно је и то, да је у већини случајева грешка мања уколико је референтна тачка препозната.

Поред претходно описаног експеримента, изведен је још један, када је од мобилног робота захтевано да се, након извршеног задатка, врати у почетну референтну тачку (сложенији задатак). У овом случају је од 21 експеримента било 10 успешних, са средњом вредношћу грешака остварених координата положаја мобилног робота у односу на задате, $\Delta x=6$ [cm] и $\Delta y=4,1$ [cm].

5. ЗАКЉУЧАК

У овом раду је анализирана могућност примене интелигентног мобилног робота за потребе унутрашњег транспорта материјала у оквиру дефинисаног радног простора изабраног технолошког система. У ту сврху осмишљен је алгоритам према којем је, у MATLAB софтверском окружењу, развијен код за управљање одговарајућег кретања мобилног робота. Управљачки код се базира на примени модела кретања и перцепције, Калмановог филтра, развијених модела вештачких неуронских мрежа и A^* алгоритма, као парцијалним деловима.

Према пројектном задатку, мобилни робот треба да се креће у складу са датим технолошким процесом за усвојене репрезентативне делове, сходно технологијама монтаже и складиштења [9]. Транспортни токови материјала су апроксимирани путањом коју робот, због својих габарита у односу на окружење, може физички да оствари. Постигнути резултати и остварена грешка позиционирања показују да је, за постављени иницијални задатак, оправдана примена предложеног концепта.

Уколико је потребно извршити сложеније технолошке задатке који подразумевају виши степен интелигентног приступа свакој машини, монтажном столу или складишту, са одговарајућом оријентацијом, неопходно би било додатно разрадити одређене подсистеме. Зато би требало да правци даљег истраживања буду оријентисани ка увођењу додатног хардвера (сензори, хватачи, итд.) и унапређењу постојећег софтверског решења. На пример, сензором блискости и применом вештачке интелигенције било би омогућено избегавање препрека и адекватно заузимање положаја у односу на објекте у окружењу, што би резултирало успешнијом реализацијом сложеног технолошког задатка.

MOBILE ROBOT FOR MATERIAL TRANSPORT IN INTELLIGENT MANUFACTURING SYSTEM - EDUCATION AND DEVELOPMENT

Abstract

This paper presents experimental results of intelligent mobile robot implementation for material transport purposes within existing manufacturing environment. Compared to conventional means of material transport this solution, based on implementation of artificial intelligence, may help to increase overall efficiency of the system. Experimental results show usability of the solution but point out limitations of proposed concept.

Keywords: *intelligent mobile robot, material transport, artificial intelligence*

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Миљковић З., **Системи вештачких неуронских мрежа у производним технологијама**, Серија монографских дела - ИТС, Књига 8, Универзитет у Београду – Машински факултет, 2003.
- [2] Миљковић З., Александрић Д., **Вештачке неуронске мреже – Збирка решених задатака са изводима из теорије**, Универзитет у Београду – Машински факултет, 2009.
- [3] Калајдић М., **Технологија машиноградње**, Универзитет у Београду–Машински факултет, 2008.
- [4] Choset H., Lynch K., Hutchinson S., Kantor G., Burgard W., Kavraki L., Thrun S., **Principles of robot motion: Theory, algorithms and implementations**, MIT, Cambridge, 2005.
- [5] Kalman R., **A new approach to linear filtering and prediction problems**, Transactions of ASME – Journal of basic engineering 82 (D), pp. 35-45, 1960.
- [6] <http://www.mindstorms.rwth-aachen.de>, последњи датум приступа: 09.04.2010.
- [7] <http://mindstorms.lego.com>, последњи датум приступа: 09.04.2010.
- [8] <http://www.mathworks.com>, последњи датум приступа: 09.04.2010.
- [9] Миљковић З., Милановић Д., Нешић Н., Стошић Д., Милановић С., **Пројектовање производних процеса у предузећу „Монтпројект“ - Београд**, Технолошко-развојни пројекат, 2004.