

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -  
БРОЈ: 3201/1  
ДАТУМ: 22.12.2011.

На основу захтева проф.др Бојана Бабића од 15.12.2011. године и чл. 12.5 Статута Машинског факултета, Истраживачко стручно веће на седници од 15.12.2011. године, донело је следећу

### ОДЛУКУ

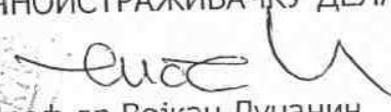
Да се за рецензенте Техничког решења рађеног у оквиру пројекта ТР-35004, под насловом: **„Хибридни управљачки алгоритам за управљање и естимацију положаја интелигентног мобилног робота уз примену система препознавања базираног на калибрисаној камери“**, чији су аутори: дипл.инж.маш. Најдан Вуковић, проф.др Зоран Миљковић, дипл.инж.маш. Марко Митић, проф.др Бојан Бабић и дипл.инж.маш. Милица Петровић, именују:

- проф.др Жељко Ђојбашић, МФ у Нишу и
- доц.др Радиша Јовановић.

Одлуку доставити: Министарству за науку и технолошки развој РС, рецензентима и архиви Факултета ради евиденције.

ПРОДЕКАН  
ЗА НАУЧНОИСТРАЖИВАЧКУ ДЕЛАТНОСТ



  
Проф.др Војкан Лучанин

## Хибридни управљачки алгоритам за управљање и естимацију положаја мобилног робота применом система препознавања на бази калибрисане камере

Најдан Вуковић<sup>1</sup>, Зоран Миљковић<sup>2</sup>, Марко Митић<sup>3</sup>, Бојан Бабић<sup>4</sup>, Милица Петровић<sup>5</sup>

### 1. ОБЛАСТ НА КОЈУ СЕ ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ ОДНОСИ

Ова метода припада области производних технологија и директно се односи на решавање проблема управљања и естимације положаја мобилних робота применом система препознавања базираних на калибрисаној камери. Метода решава проблем симултаног управљања мобилног робота путем повратних информација од калибрисане камере и естимације положаја мобилног робота за време извршавања транспортног задатка у оквиру система унутрашњег транспорта сировина, материјала и готових делова. Први део проблема решен је применом управљања на бази епиполарне геометрије и управљања на бази положаја мобилног робота, док је алгоритам естимације положаја базиран на интеграцији вештачке неуронске мреже [1] са линеаризованим Калмановим филтром. Техничко решење је настало као резултат дугогодишње сарадње са производно оријентисаним пословним системима у току које су опажени основни недостаци досадашњег начина обављања унутрашњег транспорта [2-5].

### 2. ТЕХНИЧКИ ПРОБЛЕМ

Модерно схватање унутрашњег транспорта на бази аутоматски вођених робоколица (АВР) сврстава овај вид транспорта у област мобилних робота, с обзиром да имају способност прикупљања и процесирања информација из окружења, оцене стања, планирање на основу прикупљених информација и деловање [6-15]. Конвенционални вид унутрашњег транспорта базиран на АВР одвија се у оквиру технолошких система коришћењем додатне инфраструктуре (специјална инфраструктура за простирање магнетног или електричног сигнала, а у последње време и бежична комуникационо-информационо технологија), која служи за размену информација са централном управљачком јединицом. Ова јединица надгледа функционисање транспортног подсистема и дефинише наредне транспортне задатке у складу са технолошким процесом и оценом трајања технолошких операција. Конвенционално решење унутрашњег транспорта у технолошком окружењу има два главна недостатка:

- **технолошки недостаци** - промене распореда машина алатки и локалних складишта подразумева и адаптацију досадашњег система унутрашњег транспорта. Након промене распореда неопходно је модификовати информације о положају локалних и главних складишта, као и времена трајања технолошких операција и транспортних задатака.

- **економски недостаци** – промена распореда машина алатки и складишта повлачи и промену транспортне инфраструктуре. Адаптација транспортне инфраструктуре захтева значајна средства која некада знатно превазилазе финансијске могућности производно оријентисане компаније.

Конвенционална транспортна решења на бази АВР нису флексибилна у погледу промене положаја транспортних чворова. Дакле, неопходно је развити видове унутрашњег транспорта који не зависе од додатне инфраструктуре и приоритетне информације о положају транспортних чворова у толикој мери. Да би се обезбедила флексибилност АВР неопходно је успоставити сензорски подсистем за прикупљање информација из технолошког окружења. Нова метода заснива се на камери као спољашњем сензору за аквизицију сензорских информација из технолошког окружења. Предност данашњих камера је и у количини и типу информација које могу да прикупе, као и у цени коштања. Нови хибридни управљачки алгоритам користи камеру као основни сензор за аквизицију информација које се користе за управљање и естимацију положаја мобилног робота.

<sup>1</sup> Истраживач сарадник, Иновациони центар Машинског факултета у Београду, [nvukovic@mas.bg.ac.rs](mailto:nvukovic@mas.bg.ac.rs)

<sup>2</sup> Редовни професор, Универзитет у Београду-Машински факултет, [zmiljkovic@mas.bg.ac.rs](mailto:zmiljkovic@mas.bg.ac.rs)

<sup>3</sup> Истраживач сарадник, Универзитет у Београду-Машински факултет, [mmitic@mas.bg.ac.rs](mailto:mmitic@mas.bg.ac.rs)

<sup>4</sup> Редовни професор, Универзитет у Београду-Машински факултет, [bbabic@mas.bg.ac.rs](mailto:bbabic@mas.bg.ac.rs)

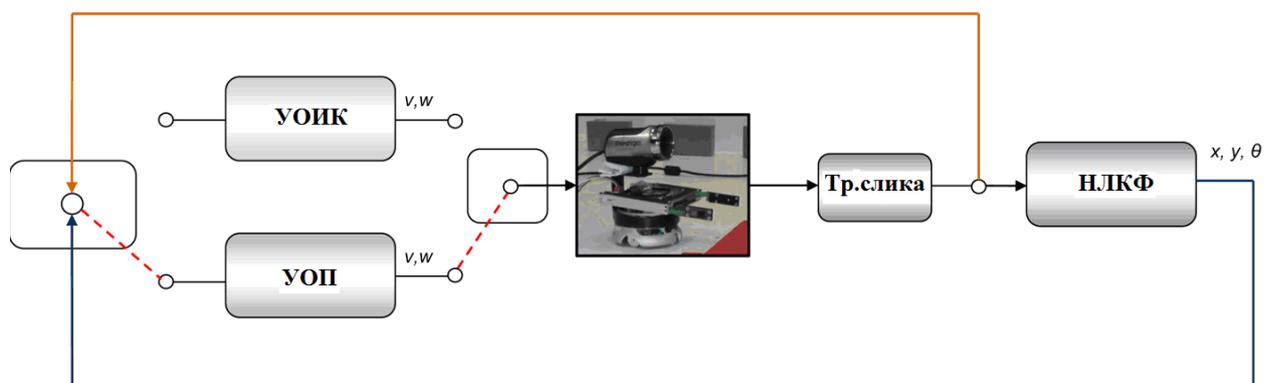
<sup>5</sup> Асистент, Универзитет у Београду-Машински факултет, [mmpetrovic@mas.bg.ac.rs](mailto:mmpetrovic@mas.bg.ac.rs)

### 3. ПОСТОЈЕЋЕ СТАЊЕ

Тренутно стање у области развоја унутрашњег транспорта на бази робоколица [6-12] показују да је модерни приступ и даље базиран на примени конвенционалних сензорских подсистема (ласерски и ултразвучни давачи блискости) за прикупљање информација из окружења. Стандардни приступ навигацији АВР у технолошком окружењу углавном се базира на примени вештачких маркера који служе као референтни објекти за естимацију положаја [7]. Напредак технологије је условио и нове видове оваквог приступа који користе бежичну технологију али са истим крајњим циљем [8]. Наведени приступи не успевају у потпуности да смање зависност од транспортне инфраструктуре. Примена система препознавања који је базиран на примени камере омогућила би постизање жељеног нивоа флексибилности у погледу зависности од транспортне инфраструктуре. Један од првих покушаја примена система препознавања на бази камере за АВР заснива се на интеграцији камере са стандардним виљушкарком [9] за потребе унутрашњег транспорта. Неки истраживачи су отишли и корак даље и тестирали перформансе развијеног система у оквиру спољашњег складишта индустријског постројења [10]. Камера је коришћена за естимацију и одређивање стандардних линија на подлози које обележавају реон у коме се виљушкар може кретати (слично додатној транспортној инфраструктури). Активно поље истраживања у виду примене камере за АВР односи се на препознавање стандардних палета и прилазак палетама ради манипулације. Овај вид примене камере може се посматрати и као покушај развоја управљања на бази повратне информације од камере, али и интеграције камере са додатним сензором [11-13]. Напредак оваквог вида употребе камере довео је до примене овог система препознавања на АВР која обављају унутрашњи транспорт у окружењима штетним по оператера [14]. На овај начин је ефектно демонстрирана применљивост камере у индустријским постројењима за потребе експлоатације АВР. Један од значајнијих резултата интеграције камере са стандардним виљушкарком је дат у оквиру референце [15] где је наглашена важност примене система препознавања на бази камере за АВР, као и да поменута интеграција представља начин остваривања жељеног нивоа интелигенције чиме би се и смањила зависност од транспортне инфраструктуре. Сви наведени резултати показују ефективност и поузданост система препознавања базираних на камери.

### 4. ДЕТАЉАН ОПИС

Нови хибридни алгоритам за управљање АВР који користи камеру за аквизицију информација чине две петље (слика 1). Прва петља је активна када се робот налази далеко у односу на положај дефинисан транспортним задатком и назива се *управљање на основу положаја (УОП)*. Ова петља основног управљачког алгоритма служи за глобалну навигацију/управљање робота од тренутног положаја до жељеног положаја, који се налази непосредно испред машине алатке или складишта. Овакав вид управљања је могуће спровести на глобалном нивоу када непрецизност у управљачком систему може бити коригована током кретања.



Слика 1. Блок дијаграм тока информација хибридног управљачког алгоритма (ХУА).

Међутим, за кретање од транспортног чвора до машине алатке или складишта потребна је значајнија тачност због чега је развијена друга петља (*управљање на основу повратне информације од камере - УОИК*). Друга петља се активира након доласка робота у жељени положај ради наставка кретања ка машини алатки или складишту и користи камеру у циљу управљања кретањем и генерисања адекватних управљачких команди. Након инкременталног кретања робот читава нову

слику објеката у окружењу (*тренутна слика*). Уколико је активна УОИК петља прочитана слика се користи за поређење детектованих позиција карактеристичних објеката и генерисање управљачких команди. Након тога, *иста слика* се прослеђује НЛКФ модулу (неуронски линеаризовани Калманов филтар) ради оцене положаја робота након извршеног кретања. С друге стране, ако је УОП петља активна робот читава нову слику која се користи *искључиво* за оцену положаја применом НЛКФ алгоритма естимације. Пошто је НЛКФ стално активан, робот у сваком тренутку „зна” свој положај.

Примена ове нове методе омогућава раздвајање транспортног задатка на два дела: **глобално управљање** (од тренутног положаја до положаја непосредно испред машине алатке или складишта) и **локално управљање** (од положаја непосредно испред машине алатке или складишта до саме машине алатке или складишта). На овај начин је елиминисана потреба за специјалном транспортном инфраструктуром у виду каблова или карактеристичних маркера, али и потреба за прецизном информацијом о положају и облику свих објеката у оквиру посматраног технолошког окружења. Предности које овај приступ има у погледу промене распореда машина алатки или складишта су евидентне.

Важно је нагласити да су УОИК и НЛКФ базирани на идентификацији карактеристичних објеката на тренутној слици, где карактеристични објекат представља објекат у равни слике који се на неки оптималан начин разликује од осталих [16,17] Већина познатих алгоритама који се користе за препознавање карактеристичних објеката одређују промену осветљења (или осенчености) на слици у некој инфинитезимално малој области. Предикцијом позиције карактеристичних објеката на слици уз примену изабраног модела промене позиције могуће је одредити разлику између превиђене позиције и измерене позиције карактеристичног објекта, а тиме и жељену величину: грешку управљања за овакав вид управљања и иновацију за естимацију положаја.

Да би генерисали одговарајуће управљачке команде у оквиру прве петље (УОП) предложеног хибридног алгоритма, потребно је знати *тренутни положај* и *жељени положај* мобилног робота (оба положаја су дефинисана у спољашњем непокретном координатном систему). УОП петља смањује грешку између поменутих положаја (у погледу жељене позиције и жељене оријентације) генерисањем одговарајућег управљања. Друга петља хибридног управљачког алгоритма захтева два параметра: *циљну слику* и *тренутну слику*. Циљна слика представља ону слику која једнозначно дефинише жељени положај робота ради манипулације радним предметом (припремак, обрадак, израдак, готов део). Аквиизиција ове слике се врши постављањем робота у жељени положај који је одређен позицијом машине алатке/складишта и радног предмета ради манипулације. За разлику од циљне слике тренутна слика се читава у сваком тренутку током кретања и представља променљиву величину. На основу разлике у позицији карактеристичних објеката на поменутих сликама, применом алгоритма управљања на бази еиполарне геометрије одређују се одговарајућа управљања. Грешка управљања на бази еиполарне геометрије се дефинише као

$$v_e = \begin{bmatrix} v_{e1} \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{e}_{cx}^d \\ \dot{e}_{tx}^d \end{bmatrix} - K_f \begin{bmatrix} e_{cx} - e_{cx}^d \\ e_{tx} - e_{tx}^d \end{bmatrix} \quad (1)$$

Матрица  $K_f = \begin{bmatrix} k_c & 0 \\ 0 & k_t \end{bmatrix}$  појачање, а њени елементи  $k_c > 0$  и  $k_t > 0$ . Промена позиције еипола одређено је познатим једнакостима као

$$\dot{e}_{cx} = -\frac{t d_x \sin(\mu - \psi)}{d \cos^2(\mu - \psi)} v + \frac{t d_x}{\cos^2(\mu - \psi)} \omega \quad \dot{e}_{tx} = -\frac{t d_x \sin(\mu - \psi)}{d \cos^2(\psi)} v \quad (2)$$

где  $\dot{e}_{cx}$  и  $\dot{e}_{tx}$  представљају тренутне и жељене вредности, а остали непознати параметри одређују се на основу усвојених претпоставки приликом увођења еиполарне геометрије ( $t$  фокална дужина,  $d_x$  димензија пиксела,  $(v, \omega)$  транслаторна и угаона брзина кретања робота, а  $(\mu, \psi)$  одговарајући углови). Основне теоријске поставке еиполарне геометрије могу се наћи у [18,19].

Током експлоатације, естимација положаја робота врши се применом неуронског линеаризованог Калмановог филтра (НЛКФ). Основна идеја неуронског ЛКФ је жеља да се увођењем вештачке неуронске мреже омогући моделирање непознатих утицаја током кретања мобилног робота, односно:

$$f_{pravo} = f(\cdot) + g(\cdot) + \delta \quad (3)$$

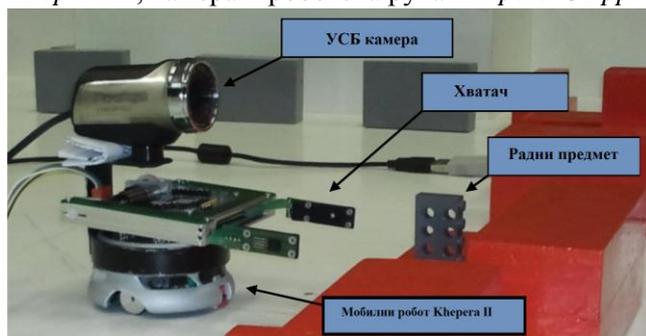
где је  $f(\cdot)$  (математички) модел кретања мобилног робота,  $g(\cdot)$  вештачка неуронска мрежа, а  $\delta$  бели шум модела. Вектор стања обухвата оцену положаја робота, параметре вештачке неуронске мреже и позицију карактеристичних објеката. Полазећи од претходне једнакости, уз увођење сензорског модела на бази камере, могуће је извести одговарајуће Јакобијане потребне за примену неуронског ЛКФ алгоритма за оцену положаја, као и у стандардном приступу [20-22].

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}_{k|k} &= \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})) \\ \mathbf{P}_{k|k} &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1} \\ \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}\end{aligned}\quad (4)$$

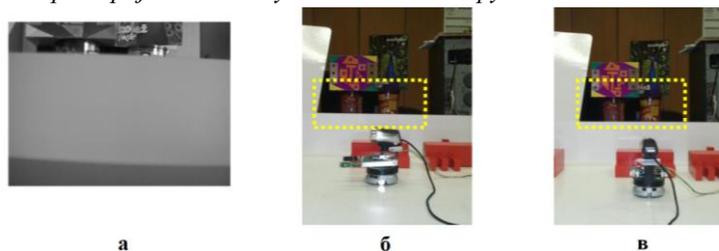
где је  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$  вектор стања система пре спроведене модификације након прикупљеног мерења, а  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$  након увођења информације мерења;  $\mathbf{P}_k, \mathbf{P}_{k|k-1}$  је одговарајућа матрица коваријанси вектора стања;  $\mathbf{z}_k$  је мерење (информација од камере),  $\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})$  предвиђено мерење, а  $\mathbf{H}_k$  Јакобијан функције мерења.

## 5. ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА ПРИМЕНЕ АЛГОРИТМА

Нови хибридни управљачки алгоритам примењен је у Matlab програмском окружењу. Десктоп рачунар (2,20 GHz; 1 MB RAM) је коришћен као централна управљачка јединица. Комуникација између рачунара и робота се извршава путем RS232 кабла, док је USB кабл коришћен за комуникацију између рачунара и камере. Резолуција слике је 320 x 240 пиксела. Мобилни робот *Khepera II*, камера и роботска рука *Khepera Gripper Turret* – хватач *KheGrip* су приказани на слици 2.



Слика 2. Мобилни робот са хватачем и камером у лабораторијском моделу технолошког окружења.



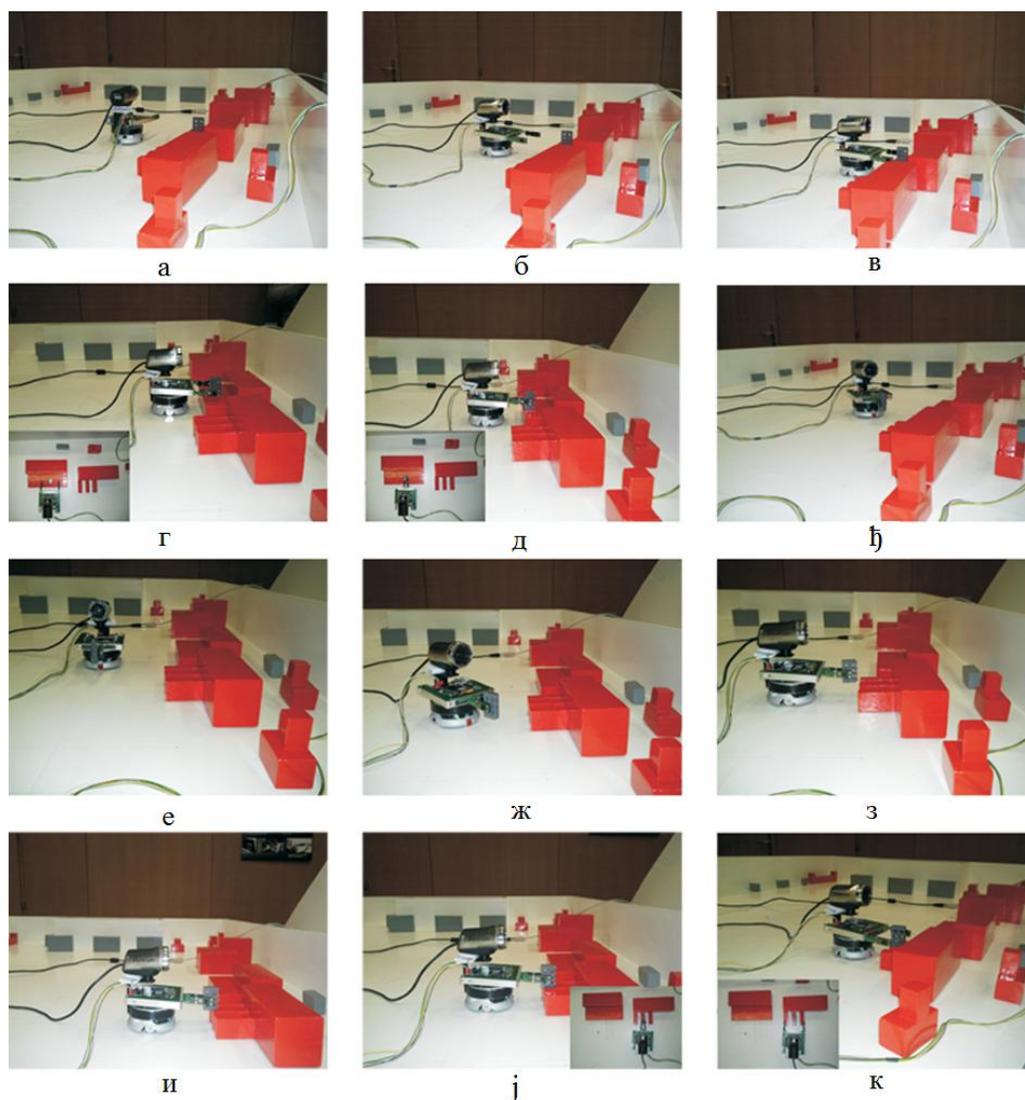
Слика 3. а) Прва циљна слика; б) и в) На почетку кретања робот не види прву циљну слику на започиње кретање сходно УОП петљи. Након извршених корекција робот долази у први циљни положај и започиње кретање према машини алатки користећи управљачке команде генерисане сходно УОИК петљи и разлици између тренутне слике и прве циљне слике. Део слике означен испрекиданом правоугаоником показује где се налази прва циља слика.

положаја (за УОП петљу) и две циљне слике (за УОИК петљу). Два циљна положаја се једноставно дефинишу у спољашњем координатном систему, док се циљне слике (слика 3) одређују аквизицијом информације очитане са камере након што је робот постављен испред машине алатке ради приступања радном предмету. Важно је нагласити да услед конструктивних разлога радни предмет ни у једном тренутку не може да се нађе у видном пољу камере, па се стога не анализира

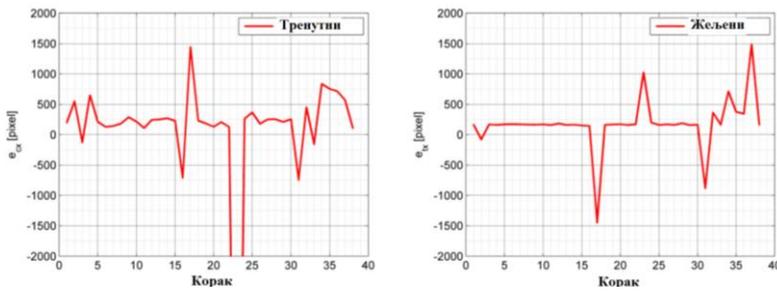
Мобилни робот се налази у произвољном познатом почетном положају. Транспортни задатак обухвата следеће захтеве: почевши од почетног положаја, мобилни робот треба да приђе првој машини алатки, ухвати радни предмет, приђе другој машини алатки и постави радни предмет на жељену позицију (видети слике 3 и 4). Анализом постављеног транспортног задатка види се да га сачињавају следећи елементарни задаци (слика 4): кретање од почетног положаја до првог циљног положаја (УОП петља); кретање од првог циљног положаја до прве машине алатке и преузимање радног предмета (УОИК петља); кретање од прве машине алатке до другог циљног положаја (УОП петља); кретање од другог циљног положаја до друге машине алатке и постављање радног предмета на жељену позицију (УОИК петља).

Робот треба два пута да изведе глобално кретање на основу УОП петље и два пута локално кретање на основу информација добијених УОИК петљом. Пре почетка кретања неопходно је дефинисати два циљна

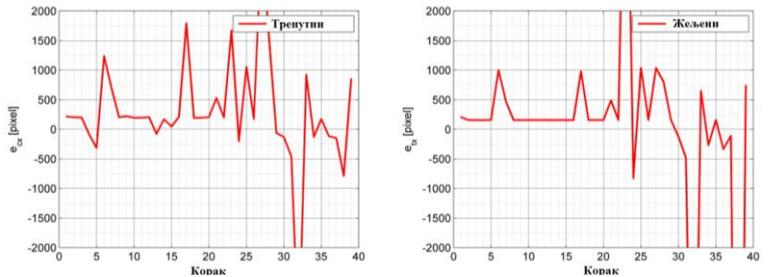
манипулација радним предметом. Ова чињеница је искоришћена као мерило успешности експеримента. Уколико робот не може да приступи радном предмету у одговарајућем положају дефинисаним циљном сликом, то значи да је дошло до појаве грешке приликом кретања. Прва циљна слика, као и регион где се она налази су приказани на слици 3. Приказ комплетног експеримента је дат на слици 4. Усвојене нумеричке вредности параметара НЛКФ су: матрица кооваријанси робота  $\Sigma_w = \text{diag}(10^{-16}, 10^{-16}, 10^{-10})$ ; матрица кооваријанси тежинских коефицијената  $\Sigma_w = 10^{-8}$ ; почетна вредност тежинских коефицијената (улазни слој  $10^{-16}$ , излазни слој  $10^{-6}$ ); промена тежинских коефицијената  $Q_w$  (улазни слој  $10^{-8}$ , излазни слој  $10^{-6}$ ). Укупан број итерација алгоритма зависи од усвојених времена која једнозначно дефинишу путању робота током извршавања УОИК петље. УОИК користи другачији алгоритам детектовања карактеристичних објеката на слици од НЛКФ-а. Поређење позиција карактеристичних објеката на циљној и тренутној слици подразумева одређивање основне матрице. Да би увели робустност у погледу промене осветљења, основна матрица се одређује применом алгоритма случајног консензуса (Random Sample Consensus-RANSAC) [23].



**Слика 4.** а) – б) Први део кретања робота (УОП); б) – в) Кретање на основу УОИК петље према положају који је дефинисан првом циљном сликом. Робот прилази радном предмету; г) – д) Робот је пришао радном предмету. Обратите пажњу да је хватач отворен на г) и затворен на д); е) – ж) Након приступања радном предмету и успешног хватања, робот наставља кретање ка другом циљном положају према управљачким командама УОП петље; з) – к) Други део кретања на основу УОИК петље. Робот прилази машини алатки и позиционира радни предмет. Обратите пажњу да је хватач на ј) затворен, а на к) отворен. Крај експеримента.

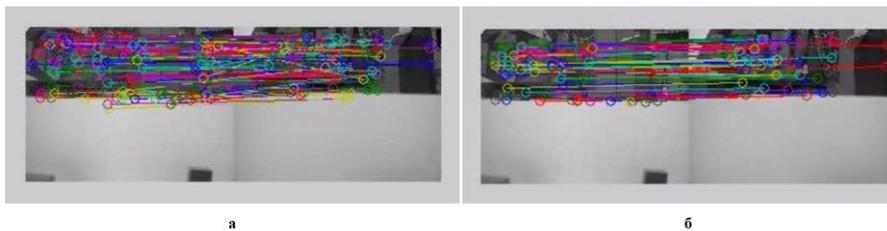


**Слика 5.** Промена вредности еипола током првог извршења УОИК петље (тренутне и жељене).



**Слика 6.** Промена вредности еипола током другог извршења УОИК петље (тренутне и жељене).

управљачких команди. Након примене робустног алгоритма случајног консензуса за оцену основне матрице (слика 7б)) види се већи број правилно идентификованих карактеристичних објеката.



**Слика 7.** Тренутна слика – циљна слика. Пре примене робустног алгоритма случајног консензуса а) и после б). Успешно идентификовано ~11 карактеристичних објеката.

за оба сегмента путање указују да је робот остварио жељени завршни положај.



а) Први сегмент УОИК.



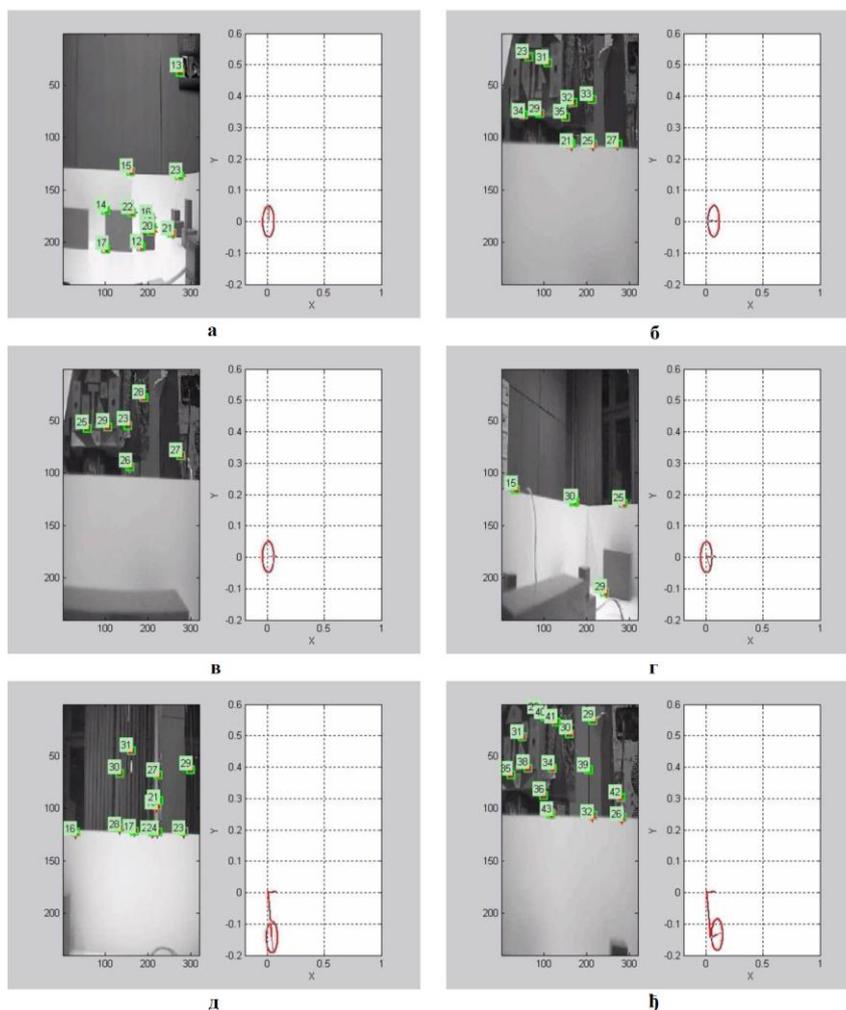
б) Други сегмент УОИК.

**Слика 8.** Почетна слика, циљна слика и завршна слика (респективно).

На сликама 5 и 6 приказана је промена вредности еипола за цело експеримент. Може да се уочи то да тренутне вредности теже жељеним вредностима када је иницирана УОИК петља хибридног алгоритма (оба пута). На слици 7 је представљен основни разлог примене робустног алгоритма случајног консензуса за оцену основне матрице. На слици 7а) се виде поређења детектованих карактеристичних објеката на тренутној слици (а) са леве стране) и циљној слици (а) са десне стране). Примећује се да велики број препознатих објеката није адекватно повезан. Ова грешка у идентификацији објеката се преноси на оцену основне матрице, а тиме и на генерисање

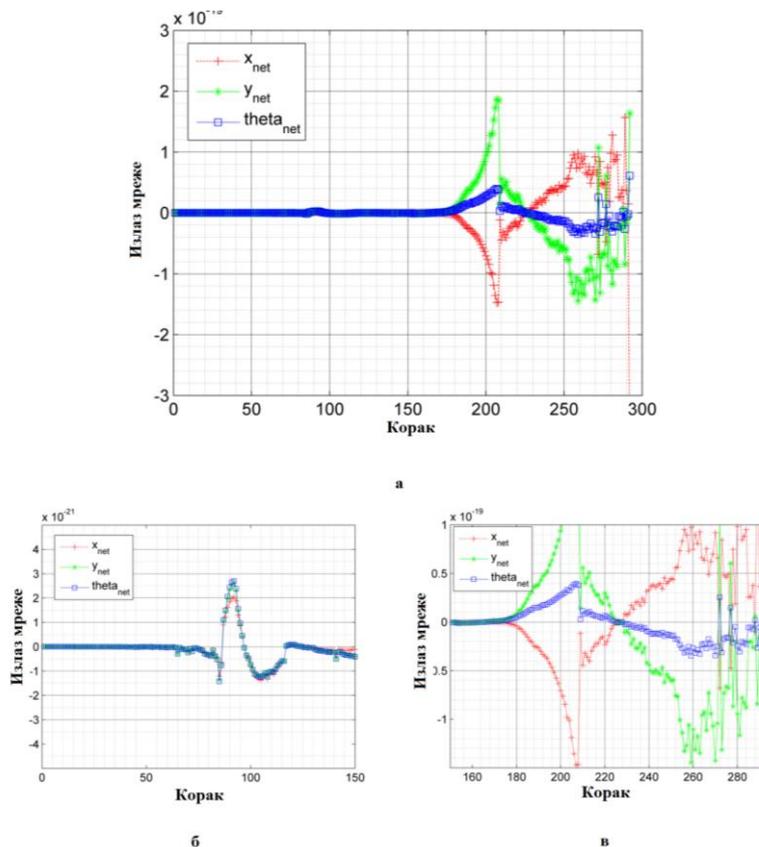
Слика 8а) и 8б) приказује почетну, циљну и завршну слику објеката за први и други сегмент путање током УОИК петље (респективно). Уочава се значајна разлика између почетних слика и циљних, као и да су завршне слике сличне циљним. Сличност циљних и завршних слика

Следећи део експерименталних резултата је везан за НЛКФ оцену положаја мобилног робота (слика 9). Слична слика је већ представљена у оквиру експерименталних резултата насталих приликом увођења НЛКФ алгоритма естимације.



**Слика 9.** *Изабрани фрејмови на основу НЛКФ естимације у реалном времену. Успешно идентификовани карактеристични објекти који се већ налазе на мапи окружења (тј. као елементи проширеног вектора стања) су дати на левој страни, док је НЛКФ оцена положаја мобилног робота дата на десној страни (слика 9 а) – њ): а) робот започиње кретање и иницијализује ~10 карактеристичних објеката; б) фрејм #75 – током првог кретања на основу УОИК петље. обратити пажњу на повећан број карактеристичних објеката; в) фрејм #101 – завршено кретање уназад (УОП петља након преузимања радног предмета); г) фрејм #143 – током промене оријентације; д) фрејм #191 – достигнута циљна позиција (следи ротација за остваривање оријентације); њ) у току друге (завршне) УОИК петље.*

На слици 10 је приказана промена излазних вредности вештачке неуронске мреже, а самим тим и оцена грешке модела кретања. Може да се примети то да у самом почетку кретања вештачка неуронска мрежа има константу излазну вредност која тежи нули. Прва значајна промена настаје око 170-те итерације за време обављања УОП петље. Од 170-те итерације до 225-те итерације (види се на слици 10 в)) вредност излаза је већа од нуле за у координату робота и мања од нуле за  $x$  координату робота. Претходно запажање наводи на закључак да вештачка неуронска мрежа „предлаже” да се оцена позиције у  $x$  правцу смањи, док је за у правац треба повећати. Око 225-те итерације обе оцене грешке у позицији робота мењају знак. Може се приметити и да су ова два дијаграма скоро симетрична.

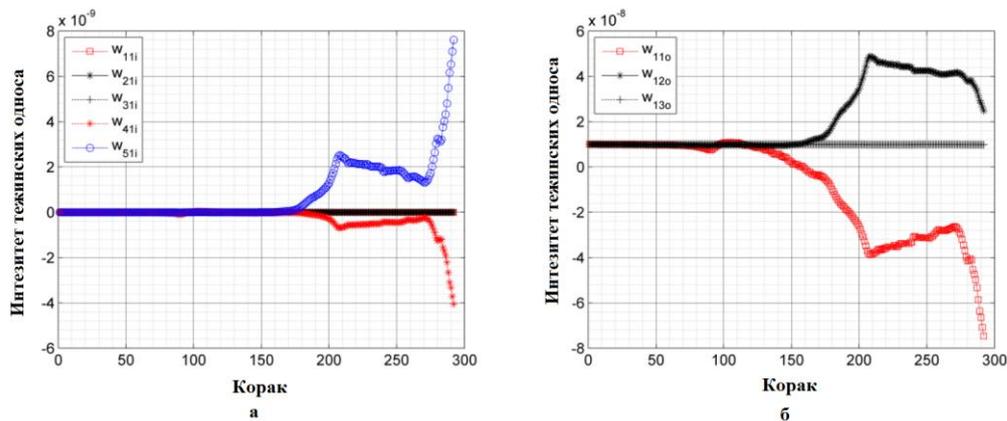


**Слика 10.** Промена излазних вредности вештачке неуронске мреже током посматраног експеримента: а) Изулазне вредности током трајања целог експеримента ; б) Промена излазних вредности од почетка до 150-те итерације; в) Промена излаза од 150-те итерације до краја експеримента.

Ранија промена вредности тежинских коефицијената може се остварити усвајањем веће вредности матрице  $Q_w$  која једнозначно дефинише „дужину корака” током естимације. Уколико усвојимо мање вредности, то значи да ће НЛКФ алгоритам током процеса естимације мање модификовати тежинске коефицијенте; на овај начин ми, као пројектанти филтра, „предочавамо” филтру да прави мање кораке током естимације. Наравно и супротан случај је валидан. Током извођења експерименталног процеса у лабораторијском моделу технолошког окружења констатовано је да нагле промене на самом почетку естимације резултирају дивергенцијом филтра која настаје када су излазне вредности вештачке неуронске мреже значајно веће од ЛКФ оцене. Ово запажање представља основни разлог због кога је усвојена мања вредност корака естимације (тј. матрице  $Q_w$ ). Међутим, важно је нагласити да је могуће применити и следећу хеуриситку: након спровођења неколико експеримената могуће је утврдити ред величине грешке модела кретања, тако да је тиме одређена и излазна вредност вештачке неуронске мреже, као и корак естимације. Овакав приступ је општеприхваћен у теорији естимације [19-21]. Спровођење великог броја експеримената са различитим почетним вредностима представља основно правило за иницијално усвајање параметара НЛКФ алгоритма.

За разлику од оцене грешке у позицији робота, оцена грешке у оријентацији нема нагле промене. Ако се изузме скок око 210-те итерације промена ове оцене током кретања је континуална.

Да би потпуно анализирали излазне вредности вештачке неуронске мреже потребно је анализирати и промену тежинских односа улазног и излазног слоја током кретања робота. Тежински коефицијенти у улазном слоју вештачке неуронске мреже за управљања ( $w_{4li}$  и  $w_{5li}$ ) су значајно већи од тежинских коефицијената за позицију ( $w_{1li}$  и  $w_{2li}$ ) и оријентацију ( $w_{3li}$ ). Посматрани тежински коефицијенти вештачке неуронске мреже скалирају управљања. Занимљиво је да значајна промена интензитета тежинских коефицијената улазног и излазног слоја настаје око 170-те итерације што одговара промени излазних вредности вештачке неуронске мреже (слика 11).



Слика 11. Промена вредности тежинских односа вештачке неуронске мреже за улазни слој а) и излазни слој б).

Укупна дужина путање је приближно 0,4 [m] и зависи од генерисаних управљачких команди. У Табели 1 је дат упоредни приказ грешке оцене за НЛКФ, ЛКФ и одометрију. Свака врста (обележена римским бројевима I и II) представља остварену грешку након доласка у крајњи положај дефинисан циљним сликама. Грешка је одређена након директног мерења жељеног положаја ( $x_{real}$ ,  $y_{real}$  и  $\theta_{real}$ ) и упоређивањем са оценом одговарајућег алгоритма естимације.

Табела 1. Грешка естимације положаја мобилног робота дата за три примењена алгоритма. Индекс „stv” означава стварни завршни положај.

	Циљни положај / циљна слика	$x - x_{stv}$ [m]	$y - y_{stv}$ [m]	$\theta - \theta_{stv}$ [°]
НЛКФ	I	0,0028	0,0021	1,59
	II	0,0029	0,0041	5,52
ЛКФ	I	0,0028	0,0022	1,61
	II	-0,0096	0,0147	6,12
Одометрија	I	0,0028	0,0028	1,65
	II	0,0316	0,0156	7,65

На основу Табеле 1 јасно се види да НЛКФ има мању грешку у односу на ЛКФ и одометрију. Сва три алгоритма показују да грешка естимације расте током кретања (што је очекивано), али НЛКФ и ЛКФ имају бољу оцену остварених положаја мобилног робота него одометрија.

## 6. ЗАКЉУЧАК

Нови хибридни управљачки алгоритам сачињавају две основне управљачке петље: управљање на основу положаја и управљање на основу информација од камере. Примена развијеног алгоритма подразумева следеће почетне параметре: циљни положај за глобалну навигацију (налази се непосредно испред машине алатке/локалног складишта - међускладишта) и циљну слику за локалну навигацију (одређена аквизицијом сензорских информација добијених од камере након постављања робота у жељени положај који омогућава преузимање радног предмета). Овакав приступ раздваја почетни транспортни задатак на два дела: кретање од почетног положаја до циљног положаја (глобално) и кретање од циљног положаја до машине алатке/ међускладишта (локално). На овај начин је елиминисана потреба за прецизном информацијом о распореду објеката у технолошком окружењу. Поред ове предности, треба нагласити да за примену развијеног хибридног управљачког алгоритма нису потребни вештачки постављени карактеристични објекти у технолошком окружењу ради навигације АВР. Развијени хибридни алгоритам се може секвенцијално применити на више транспортних задатака.

У сваком тренутку током обављања транспортног задатка мобилни робот оцењује свој положај и позицију карактеристичних објеката у виду алгоритма неуронског линеаризованог Калмановог филтра уз примену камере као сензора. Вештачка неуронска мрежа (једнослојни перцептрон) је

спрегнута са стандардним линеаризованим Калмановим филтром у циљу моделирања непознатих стохастичких променљивих које нису предвиђене усвојеним моделом кретања мобилног робота. НЛКФ оцењује положај и тежинске односе вештачке неуронске мреже у реалном времену.

Указано је на малу разлику између жељене слике објеката и остварене слике што говори у прилог примени развијеног хибридног управљачког алгоритма. Робот је дошао до првог циљног положаја, започео нови сегмент кретања ка машини алатки, преузео радни предмет, наставио кретање ка другом циљном положају, спровео завршно кретање сходно другој циљној слици и позиционирао радни предмет (слика 4).

Предложени хибридни управљачки алгоритам се разликује од досадашњег приступа у следећем:

- Раздвајањем почетног транспортног проблема на два подпроблема успешно је решен *проблем видног поља*, тј. проблем у области управљања на бази повратне информације од камере који дефинише случај у коме карактеристични објекти нису у видном пољу камере (енг. Field of View).

- Алгоритам изискује четири параметра, од којих се два дефинишу на самом почетку (циљни положај и циљна слика) док су друга два променљива и читавају се у сваком тренутку током кретања (тренутни положај и тренутна слика). Циљни положај робота се једноставно дефинише у спољашњем координатном систему, док се циљна слика одређује постављањем робота у жељени положај непосредно испред машине алатке или складишта. На овај начин елиминисана је потреба за додатном транспортном инфраструктуром или вештачким карактеристичним објектима.

- Естимација положаја се углавном обавља применом одометрије, ЛКФ-а или специјално развијеним методама (погледати наведене референце [6-15]). Ни у једном од ових радова није примењен оригинално развијен НЛКФ. Поред ове разлике потребно је поменути и да они радови који користе ЛКФ третирају искључиво *проблем локализације*, док је у овој новој методи примењен оригинални НЛКФ за *симултану локализацију и изградњу мапе окружења*. Уколико дође до промене распореда машина алатки и складишта/међускладишта, предложени приступ омогућава већу флексибилност пошто почива на мањем обиму почетних информација о технолошком окружењу.

## 7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Миљковић З., Александрић Д., Вештачке неуронске мреже – Збирка решених задатака са изводима из теорије, Универзитет у Београду – Машински факултет, 2009.
- [2] Бабић Б., Миљковић З., Бојовић Б., Вуковић Н., Снимање рада и одговарајућих технолошких времена линија за производњу лименки у компанији АД ФМП – Београд, Београд 2008.
- [3] Бабић Б., Миљковић З., Нешић Н., Управљање технолошким информацијама у предузећу „ВУСК“ – Београд, Београд 2007.
- [4] Миљковић З., Милановић Д., Нешић Н., Стошић Д., Милановић С., Пројектовање производних процеса у предузећу „Монтпројект“, Београд 2004.
- [5] Миљковић,З., Бабић,Б., Вуковић,Н., Бојовић,Б., Терминирање производње и утврђивање временских норматива у структури пројектованог технолошког процеса коришћењем методе снимања (*нова метода*: системско решење терминирања производње у оквиру интегрисаног дигиталног пословања; метода развијана у технолошким пројектима за предузећа „Монтпројект“ - Београд, „ВуСК“ - Београд и „ФМП д.о.о.“ - Београд, као и кроз активности пројекта технолошког развоја TP-14031 МНТР Владе Републике Србије).
- [6] Martinez-Barbera H, Herrero-Perez D (2010) Autonomous navigation of an automated guided vehicle in industrial environments. Robot CIM-Int Manuf, 26(4): 296–311.
- [7] Ronzoni D, Olmi R, Secchi C, Fantuzzi C (2011) AGV global localization using indistinguishable artificial landmarks. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China. pp.287-292.
- [8] Lozoya C, Marti P, Velasco M, Fuertes JM, Martin EX (2011) Simulation study of a remote wireless path tracking control with delay estimation for an autonomous guided vehicle. Int J Adv Manuf Tech, 52(5-8):751-761.
- [9] Garibotto G, Masciangelo S, Bassino P, Coelho C, Pavan A, Marson M, Elsag Bailey G (1998) Industrial exploitation of computer vision in logistic automation: autonomous control of an intelligent forklift truck. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium. 2: 1459–1464.
- [10] Rodriguez FJ, Mazo M, Sotelo MA (1998) Automation of an industrial fork lift truck, guided by artificial vision in open environments. Auton Robot, 5: 215–231

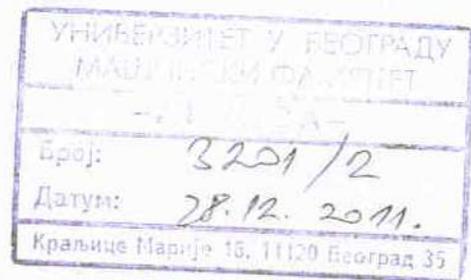
- [11] Baglivo L, Biasi N, Biral F, Bellomo N, Bertolazzi E, Lio MD, Cecco MD (2011) Autonomous pallet localization and picking for industrial forklifts: a robust range and look method. *Meas. Sci. Technol.*, 22.
- [12] Seelinger M, Yoder JD (2006) Automatic visual guidance of a forklift engaging a pallet. *Robot Auton Syst*, 54: 1026–1038
- [13] Tamba TA, Hong H, Hong KS (2009) A Path Following Control of an Unmanned Autonomous Forklift. *Int J Control Autom*, 7(1):113-122.
- [14] Pradalier C, Tews A, Roberts J (2008) Vision-based operations of a large industrial vehicle - autonomous hot metal carrier. *J Field Robot*, 25(4-5): 243–267.
- [15] Kelly A, Nagy B, Stager D, Unnikrishnan R (2007) An infrastructure-free automated guided vehicle based on computer vision. *IEEE T Robotic Autom*, 14(3): 24–34.
- [16] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, Van Gool L (2008) SURF: Speeded Up Robust Features. *Comput Vis Image Und.* 110(3):346—359.
- [17] Rosten E, Porter R, Drummond T (2010) FASTER and better: A machine learning approach to corner detection. *IEEE T Pattern Anal.* 32 (1):105-119
- [18] López-Nicolás G, Sagüés C, Guerrero JJ, Kragic D, Jensfelt P (2008) Switching visual control based on epipoles for mobile robots. *Robot Auton Syst*, 56(7): 592-603.
- [19] López-Nicolás G, Guerrero JJ, Sagüés C (2010) Visual control of vehicles using two-view geometry. *Mechatronics*, 20(2): 315-325.
- [20] Davidson A, Reid I, Molton N, Stasse O (2007) MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM. *IEEE T Pattern Anal.* 29 (6):1052-1067.
- [21] Civera J, Grasa OG, Davison AJ, Montiel JMM (2010) 1-point RANSAC for EKF filtering. Application to real-time structure from motion and visual odometry. *J Field Robot*, 27 (5): 609–631.
- [22] Kramer KA, Stubberud SC (2010) Tracking of multiple target types with a single neural extended kalman filter. *Int J Intell Sys*, 25: 440-459.
- [23] Fischler MA, Bolles RC (1981) Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Commun ACM.* 24 (6): 381–395.

Одлуком Истраживачко-стручног већа Машинског факултета у Београду бр. 3201/1 од 22.12.2011. године именовани смо за рецензенте нове методе под називом „Хибридни управљачки алгоритам за управљање и естимацију положаја мобилног робота применом система препознавања на бази калибрисане камере” аутора: Најдан Вуковић дипл.инж.маш., проф. др Зоран Миљковић, Марко Митић дипл.инж.маш., проф. др Бојан Бабић, асистент Милица Петровић, дипл.инж.маш.-мастер. На основу предлога и након анализе методе подносимо следећи:

## ИЗВЕШТАЈ

Нова метода (M85) „Хибридни управљачки алгоритам за управљање и естимацију положаја мобилног робота применом система препознавања на бази калибрисане камере” представљена је на 11 страница А4 формата, коришћењем Times New Roman фонта величине 11 pt, једноструког прореда. Опис методе садржи четири једначине, 11 слика и један табеларни приказ резултата примене нове методе представљених у пет тематских целина, уз закључак и списак коришћене литературе:

1. Област на коју се техничко решење односи
2. Технички проблем
3. Постојеће стање
4. Детаљан опис техничког решења
5. Приказ резултата примене
6. Закључак



Нова метода припада области производних технологија и директно се односи на унутрашњи транспорт материјала, сировина и готових делова. Метода претпоставља да се унутрашњи транспорт обавља применом мобилних робота и омогућава решавање проблема управљања и естимације положаја робота применом система препознавања базираних на калибрисаној камери. Метода решава проблем истовременог управљања мобилног робота путем повратних информација од калибрисане камере и естимације положаја мобилног робота за време извршавања транспортног задатка у оквиру подсистема унутрашњег транспорта технолошког система. Аутори наводе да је нова метода настала као један од резултата дугогодишње сарадње са производно оријентисаним компанијама.

У другом и трећем поглављу уведен је технички проблем који се директно решава применом нове методе. Указано је на то да, по модерном схватању, не постоји разлика између традиционалног схватања улоге аутоматски вођених робоколица (АВР) и савремених мобилних робота. Констатовано је да конвенционални вид обављања унутрашњег транспорта применом робоколица и даље има висок степен зависности од додатне инфраструктуре неопходне у циљу извршавања транспортног задатка. Зависност од специфичне секундарне инфраструктуре представља изразит проблем приликом промене распореда машина алатки и локалних складишта - међускладишта. Идентификовани су технолошки и економски недостаци промене диспозиционог плана у погледу унутрашњег транспорта, уз коришћење и примену мобилних робота. Нова метода омогућава несметано обављање транспортних задатака и након промене распореда локалних транспортних одредишта.

Четврто поглавље приказује суштину техничког решења, уводи нови хибридни алгоритам и приказује начин на који се обавља симултано управљање и естимација положаја мобилног робота. У поглављу се уводе и појашњавају следећи појмови: управљање на бази епиполарне геометрије, естимација положаја мобилног робота применом интеграције вештачких неуронских мрежа и линеаризованог Калмановог филтра, као и појам карактеристичног објекта на слици. Поменути појмови представљају основу предложеног техничког решења.

У оквиру петог поглавља представљени су експериментални резултати остварени током примене нове методе на мобилном роботу *Khepera II* (са роботском руком *Khepera Gripper Turret* – хватач *KheGrip*) и стандардној USB камери. У првом делу су дата појашњења у вези хардверско-софтверске имплементације нове методе. Након тога, извештај приказује како се применом нове методе може превазићи зависност мобилног робота (робоколица) од транспортне инфраструктуре. Ово поглавље даје детаљан приказ функционисања свих делова развијеног хибридног управљачког алгоритма. Приказана је промена вредности епипола током кретања и констатовано

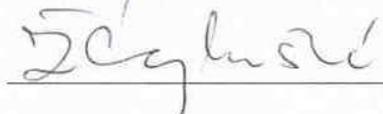
је да постоји разлика (незнатна) између тренутних вредности и жељених вредности. Међутим, разлика није значајно велика да би угрозила перформансе самог хибридног управљачког алгоритма. Поред вредности епипола, показано је и како алгоритам најмањег консензуса обезбеђује препознавање великог броја карактеристичних објеката у реалном времену, уз постојање већег броја неадекватно препознатих објеката. Показано је и то да ће коначан резултат бити мањи број препознатих карактеристичних објеката уколико се не примени алгоритам најмањег консензуса. Естимација положаја мобилног робота током кретања обавља се применом оригинално развијеног неуронског линеаризованог Калмановог филтра (НЛКФ), који представља интеграцију вештачких неуронских мрежа са стандардним линеаризованим Калмановим филтром (ЛКФ). Примена овог алгоритма омогућава моделирање непознатих стохастичких утицаја који се појављују током кретања мобилног робота, што полазни математички модел кретања не дозвољава. Применом вештачких неуронских мрежа у интеграцији са Калмановим филтром могуће је спровести естимацију непознатих величина у реалном времену, уз узимање у обзир спољашњих стохастичких утицаја. Експериментални резултати показују како крајње излазне вредности вештачке неуронске мреже модификују коначан резултат естимације положаја мобилног робота применом ЛКФ. У директном поређењу, НЛКФ генерише боље резултате од стандардног приступа (одометрија и линеаризовани Калманов филтар).

У оквиру закључка наглашено је да примена нове методе омогућава раздвајање почетног транспортног задатка на два дела: кретање од почетног положаја до циљног положаја (глобално) и кретање од циљног положаја до машине алатке/међускладишта - локалног складишта (локално). На овај начин је елиминисана потреба за прецизном информацијом о распореду објеката у технолошком окружењу. Поред ове предности, треба нагласити да за примену развијеног хибридног управљачког алгоритма нису потребни вештачки постављени карактеристични објекти у технолошком окружењу ради навигације АВР, чиме је елиминисана потреба за секундарном инфраструктуром. Развијени хибридни алгоритам може да се примени секвенцијално на више транспортних задатака.

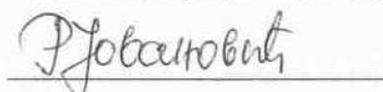
Посебно је важно истаћи очигледну могућност примене нове методе за решавање проблема унутрашњег транспорта базираног на коришћењу мобилних робота, што значи да шири круг потенцијалних корисника - производно оријентисаних компанија може да има евидентне користи. У том смислу, након анализе предлога нове методе и остварених резултата дајемо следеће

## МИШЉЕЊЕ

Аутори нове методе (M85) „Хибридни управљачки алгоритам за управљање и естимацију положаја мобилног робота применом система препознавања на бази калибрисане камере” су на јасан начин описали основне теоријске концепте директно везане за управљање мобилног робота на основу повратне информације добијене од калибрисане камере и естимацију његовог положаја током обављања унутрашњег транспорта у технолошком окружењу. Примена нове методе омогућава раздвајање иницијалног транспортног задатка на глобални и локални део, чиме се на очигледан начин елиминише потреба за специфичном транспортном инфраструктуром. Резултати остварени применом нове методе указују на то да постоји евидентан допринос у анализи и синтези постојећег стања и да нова метода омогућава једноставан и ефикасан начин управљања и естимацију положаја мобилног робота коришћењем система препознавања на бази калибрисане камере. На основу увида у предлог нове методе и остварене резултате предлажемо Истраживачко-стручном већу Машинског факултета у Београду да се нова метода (M85) под називом „Хибридни управљачки алгоритам за управљање и естимацију положаја мобилног робота применом система препознавања на бази калибрисане камере” прихвати као ново техничко решење.



Проф. др Жарко Тојбашић  
Машински факултет у Нишу



Доц. др Радиша Јовановић  
Универзитет у Београду-Машински факултет



Београд, 16. 01. 2012. године

**Предмет:** Мишљење о реализацији пројекта „Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима“ (ТР-35004)

Пројектом су обухваћена два основна циља истраживања: одређивање параметара производње делова од лима и управљање унутрашњим транспортом материјала са акцентом на примени еколошких принципа који подразумевају уштеду енергије, материјала и средстава за подмазивање.

Као резултат првог циља истраживања настала је нова метода за одређивање запремине лубриканта, базирана на тродимензионалним снимцима лима и обрађене површине лименке, који се анализирају применом концепта лагураности. На основу овог поступка, омогућава се процена потребне запремине лубриканта. Наведено смањује употребу средстава за подмазивање у индустрији металних производа, што је конкретна примена еколошких принципа у интелигентним технолошким системима.

Резултати остварени у другом истраживачком правцу, који су од важности за компанију ФМП д.о.о., су две нове методе. У првој методи је приказано решење проблема симултаног управљања мобилног робота путем повратних информација од калибрисане камере и естимације положаја мобилног робота за време извршавања транспортног задатка у оквиру система унутрашњег транспорта сировина, материјала и готових делова. У оквиру друге методе приказано је увођење интелигентне роботизоване манипулације радним предметима (припремак, обрадак, израдак, готов део) у оквиру технолошких система за производњу делова од лима, на бази развијеног хибридног емпиријског управљачког алгоритма.

Након увида у примењивост нових техничких решења, која су проистекла као резултати истраживања у оквиру пројекта, и на основу досадашње сарадње са реализаторима, компанија ФМП д.о.о. изражава задовољство спроведеним истраживањима и оствареним резултатима.



Генерални директор ФМП д.о.о.

Небојша Стојановић, дипл. маш. инж.

11000 Beograd, Jugoslovenska br. 2; Tel: 011 655 75 33, Fax: 011 655 75 73

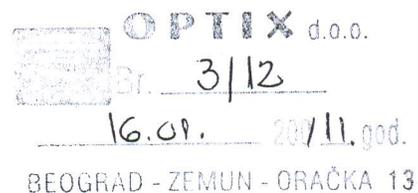
www.fmp.co.rs

office@fmp.co.rs



"OPTIX" Preduzeće za proizvodnju, promet i servisiranje optičkih i optoelektronskih uređaja d.o.o.  
"OPTIX" Enterprise for manufacturing trading and servicing optical and optoelectrical instruments

Београд, 16. 01. 2012. године



Предмет: Мишљење о реализацији пројекта  
„ИНОВАТИВНИ ПРИСТУП У ПРИМЕНИ ИНТЕЛИГЕНТНИХ  
ТЕХНОЛОШКИХ СИСТЕМА ЗА ПРОИЗВОДЊУ ДЕЛОВА ОД  
ЛИМА ЗАСНОВАН НА ЕКОЛОШКИМ ПРИНЦИПИМА“  
Евиденциони број TP-35004

Након увида у резултате истраживања који су објављени и представљени на научним скуповима домаћег и међународног значаја, као и у примењивост новог техничког решења, и на основу досадашње сарадње са реализаторима, компанија OPTIX д.о.о. изражава задовољство спроведеним истраживањима и оствареним резултатима.

Генерални директор OPTIX д.о.о.

Драгомир Стаменковић, дипл. маш. инж.



31  
УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -  
БРОЈ: 3201/2  
ДАТУМ: 28.12.2011.

На основу захтева проф.др Бојана Бабића од 15.12.2011. године и чл. 12.5 Статута Машинског факултета, Истраживачко стручно веће на седници од 28.12.2011. године, донело је следећу

### ОДЛУКУ

Прихвата се Техничко решење рађено у оквиру пројекта TR-35004, под насловом: **„Хибридни управљачки алгоритам за управљање и естимацију положаја интелигентног мобилног робота уз примену система препознавања базираног на калибрисаној камери“**, чији су аутори: дипл.инж.маш. Најдан Вуковић, проф.др Зоран Миљковић, дипл.инж.маш. Марко Митић, проф.др Бојан Бабић и дипл.инж.маш. Милица Петровић, а позитивну рецензију поднели: проф.др Жељко Ђојбашић, МФ у Нишу и доц.др Радиша Јовановић.

Одлуку доставити: Министарству за науку и технолошки развој РС, рецензентима и архиви Факултета ради евиденције.

ПРОДЕКАН  
ЗА НАУЧНОИСТРАЖИВАЧКУ ДЕЛАТНОСТ



Проф.др Војкан Лучанин