

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
БРОЈ: 2407/2
ДАТУМ: 05.12.2013.

На основу захтева проф.др Бојана Бабића бр. 2407/1 од 04.12.2013. године и чл. 12.5 Статута Машинског факултета, Истраживачко стручно веће на седници од 05.12.2013. године, донело је следећу

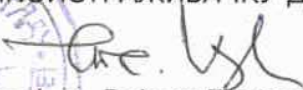
ОДЛУКУ

Да се за рецензенте Техничког решења под насловом: ***„Праћење жељене трајекторије и визуелно навођење мобилног робота у технолошком окружењу на бази биолошки инспирисаног метахеуристичког алгоритма”***, чији су аутори: Марко Митић дипл.инж.маш., проф.др Зоран Миљковић, др Најдан Вуковић, научни сарадник, и мр Иван Лазаревић, дипл.инж.маш., именују:

- др Мирко Ђапић, Факултет за машинство и грађевинарство, Краљево и
- доц.др Радиша Јовановић.

Одлуку доставити: Министарству просвете, науке и технолошког развоја РС, рецензентима и архиви Факултета ради евиденције.

ПРОДЕКАН
ЗА НАУЧНОИСТРАЖИВАЧКУ ДЕЛАТНОСТ



Проф.др Војкан Лучанин



Праћење жељене трајекторије и визуелно навођење мобилног робота у технолошком окружењу на бази биолошки инспирисаног метахеуристичког алгоритма

Марко Митић¹, Зоран Миљковић², Најдан Вуковић³, Иван Б. Лазаревић⁴

1. ОБЛАСТ НА КОЈУ СЕ ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ ОДНОСИ

Техничко решење припада области машинства и директно се односи на решавање проблема управљања интелигентног мобилног робота применом емпиријске управљачке теорије на бази биолошки инспирисаног алгоритма оптимизације, машинског учења демонстрацијом и хомографије добијене од некалибрисане камере, и може се уврстити у напредне производне технологије. Нова метода представља решење два независна проблема управљања у домену унутрашњег транспорта материјала: (i) праћења жељене трајекторије до положаја дефинисаног у равни слике и (ii) визуелног управљања на бази хомографије и машинског учења демонстрацијом. *Метахеуристички алгоритам оптимизације колонијом свитаца* имплементиран је у оквиру машинског учења демонстрацијом у циљу решавања поменутих проблема. Управљачке команде мобилног робота за реализацију 15 трајекторија жељеног облика меморисане су у модулу демонстрација, док модул машинског учења подразумева имплементацију поменуте методе оптимизације у циљу одређивања оптималне трајекторија робота. Резултати експеримента на мобилном роботу *KheperaII* (са камером *KheCMUCam* и хватачем *KheGrip*) у лабораторијском модел технолошког окружења потврђују да робот прати оптималну путању у реалном времену, односно да се алгоритам оптимизације колонијом свитаца може успешно корисити ради одређивања оптималног понашања робота. Истовремено, ова техника вештачке интелигенције употребљена је и за визуелно навођење робота. У *offline* фази, алгоритам оптимизације колонијом свитаца употребљен је ради кориговања оријентације мобилног робота у случају да се претходно детектовани карактеристични објекат налази изван дефинисане жељене области у равни слике, док *online* фаза обухвата израчунавање транслаторне брзине на бази хомографије у циљу промене позиције робота. Експериментални резултати су показали да је могуће успешно реализовати прихватање радног предмета и одлагање истог дела на машини алатки у лабораторијском моделу технолошког окружења.

2. ТЕХНИЧКИ ПРОБЛЕМ

Праћење трајекторије жељеног облика је од велике важности са аспекта успешног унутрашњег транспорта материјала у технолошком окружењу [1]. У случају управљања на бази информација добијених од камере, релативно је честа појава да се одређена машина алатка налази изван видног поља камере мобилног робота, или да се мобилни робот налази на удаљености од машине на којој није могуће извршити визуелно навођење (услед великих грешака у положају карактеристичних објеката у равни тренутне и циљне слике). У тим случајевима, може се применити метода управљања на основу положаја уз примену Калмановог филтра [2] како би робот достигао жељену позицију и оријентацију пре активирања камере и интегрисаног система препознавања. Још једно решење је примена концепта учења демонстрацијом у коме учитељ (човек или други робот) „указује“ на модел успешног понашања робота. Другим речима, жељене трајекторије робота се најпре демонстрирају од стране оператора (човека-демонстратора), а затим се испитује валидност забележених управљачких команди. С обзиром на различите нелинеарности које постоје приликом управљања роботских система (од несавршености израде појединих компоненти до немерљивих поремећаја и грешака у подсистемима робота), неопходно је извршити оптимизацију ових управљачких величина. У циљу одређивања оптималне трајекторије робота у окружењу, развијен је биолошки инспирисан алгоритам

¹ Истраживач сарадник, Универзитет у Београду-Машински факултет, mmitic@mas.bg.ac.rs

² Редовни професор, Универзитет у Београду-Машински факултет, zmiljkovic@mas.bg.ac.rs

³ Научни сарадник, Иновациони центар Машинског факултета у Београду, nvukovic@mas.bg.ac.rs

⁴ Истраживач сарадник, „ECOLAB Hygiene“, д.о.о., Београд, atlant@ptt.rs

оптимизације који припада научној области *теорије ројева* (енгл. *Swarm intelligence*). Нови интелигентни систем управљања на бази метахеуристичког алгоритма тестиран је у лабораторијском моделу технолошког окружења, а експериментални резултати су доказали предности емпиријског приступа пројектовању управљачких система.

Од 2000. године визуелно навођење на бази хомографије је широко заступљено у домену мобилне роботике. Један од основних разлога за ово је релативно једноставна имплементација и робустност у погледу грешке са аспекта унутрашњих параметара камере и удаљености од изабраног објекта у сцени. Употребом елемената хомографске матрице за прорачун управљања мобилног робота елиминисана је потреба за информацијама о распореду машина и додатним „вештачким“ маркерима у технолошком окружењу. Међутим, познато је да постоје различити проблеми при естимацији хомографске матрице као што су: (i) имплементација алгоритма препознавања карактеристичних објеката, (ii) детекција равни хомографије у 3D сцени, (iii) утицај амбијенталног осветљења на прорачун управљачких команди робота, итд. [3,4]. Решење наведених проблема обухвата имплементацију техника вештачке интелигенције у процес пројектовања управљачког система [5,6]. У оквиру овог извештаја, биолошки инспирисан метахеуристички алгоритам интегрисан је у хибридную схему управљања у циљу реализације жељене трајекторије и робустног визуелног навођења мобилног робота на бази хомографије у технолошком окружењу.

На самом почетку извештаја представљене су теоријске основе проблема. У трећем поглављу, развијени емпиријски управљачки систем на бази метахеуристичког алгоритма и хомографије упоређен је са сродним системима у свету. Суштина техничког решења представљена је у четвртм делу извештаја. На крају извештаја дата је експериментална верификација предложеног управљачког система, као и правци даљих истраживања која ће се спроводити у оквиру актуелног пројекта технолошког развоја под називом „*Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима*” (евиденциони број TP-35004).

Теоријске основе проблема

С обзиром да развијена схема управљања третира два проблема (праћење трајекторије и визуелно навођење), емпиријски управљачки систем се састоји од два управљачка подсистема и параметра активације који указује на то који је од њих активан у посматраном тренутку. У овом одељку ће посебно бити описан сваки од ових елемената, као и њихова интеграција са аспекта разматраног задатка навигације у технолошком окружењу.

Теоријске поставке биолошки инспирисаног метахеуристичког алгоритма и парадигме машинског учења демонстрацијом

У општем случају, теорија ројева представља скупа математичко-алгоритамских процедура које се базирају на колективној интелигенцији скупа појединачних јединки [7,8]. Циљ различитих техника ове теорије је проналажење оптималног решења изабраног проблема. Алгоритми на бази ројева су најчешће инспирисани социјалним понашањем јединки јата риба, птица, мрав и др. У већини приступа колективно деловање роја зависи од свих чланова, с тим да се фаворизује понашање које је глобално најповољније. Другим речима, свака јединка добија информације од својих суседа о ваљаности својих акција, док је истовремено будуће напредовање засновано на претходним сазнањима целокупног роја. Овакав приступ у оптимизацији омогућава еволутивно (итеративно) напредовање свих чланова скупа, с тим да су перформансе алгоритма оцењене према науспешнијим јединкама.

Метахеуристички алгоритам имплементиран у оквиру хибридног система управљања базира се на понашању свитаца у колонији. Алгоритам оптимизације колонијом свитаца развио је професор Јанг (Yang) са Униврзитета Кембриџ у Великој Британији 2007. године [9,10]. Инспирисан комуникацијом између јединки у роју током процеса груписања ради проналажења хране и парања. Светлост коју емитују свици уједно представља и упозорење у случају настанка опасности односно присуства предатора. Познато је да је јачина светлости два извора обрнуто пропорционална квадрату растојању између њих ($I \approx 1/r^2$), што представља погодну чињеницу при разматрању математичког описа ове појаве. Истовремено, апсорпција светлости у ваздуху се не може занимарити при одређивању јачине сигнала успостављене између два емитера светлости, односно два члана исте колоније. На основу

овога може се извести израз за јачину светлости у зависности од растојања између два извора светлости:

$$I(r) = I_0 \cdot e^{-\gamma r^2} \quad (1)$$

где је: r поменуто растојање, I_0 почетна јачина светлости коју емитију два извора светлости, γ коефицијент апсорбције ваздуха. Како би се ова релација повезала са понашањем колоније свитаца, неопходно је увести следеће претпоставке:

- Сви елементи колоније се понашају исто, без обзира на пол и године старости.
- Привлачност (енгл. *Attractiveness*) између две јединке је директно пропорционална јачини светлости коју оне емитију, а обрнуто пропорционална растојању између њих. Члан колоније који емитије мању количину светлости се креће ка јединки која је већи емитер, а у случају непостојања јаче светлости свитац се креће у произвољном правцу (енгл. *Random*).
- Јачина светлости појединачне јединке колоније зависи од проблема оптимизације; нпр., у сличају оптимизације нелинеарне функције, величина I је пропорционална тродимензионалном облику те нелинеарности.

На основу ових претпоставки сада је могуће усвојити израз за параметар привлачности појединачних елемената колоније. Аналогно са једначином (1), привлачности свитаца је одређена релацијом:

$$\beta = \beta_0 \cdot e^{-\gamma r^2}, \quad (2)$$

која се за одређену класу проблема може апроксимирати помоћу [10]:

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + \gamma r^2}. \quad (3)$$

Растојање између две јединке одређено је помоћу Еуклидске норме преко:

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2}, \quad (4)$$

где $x_{i,k}$ и $x_{j,k}$ представљају k -ту просторну координату i -тог и j -тог члана колоније, респективно. У случају дводимензионалног простора, растојање r_{ij} се израчунава као:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \quad (5)$$

Коначно, може се формирати израз за промену положаја i -тог свица у правцу пораста јачине светлости (у правцу јединке j):

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r^2} + \alpha \varepsilon_i, \quad (6)$$

где α представља фактор случајности (усваја се из интервала $[0, 1]$ и може се експоненцијално смањивати у току процеса оптимизације), ε_i случајни број (енгл. *Random*) одабран према Гаусовој или униформној расподели. У најједноставнијем случају, параметар ε_i се може заменити једначином:

$$\varepsilon_i = \text{random}(0, 1) - 0,5. \quad (7)$$

Псеудокод алгоритма оптимизације колонијом свитаца дат је у табели 1.

Табела 1. Псеудокод алгоритма оптимизације колонијом свитаца	
1.	Иницијализација броја чланова колоније свитаца, почетне јачину светлости сваког члана (I_i), и коефицијента апсорбције γ
2.	Почетак <i>итеративног</i> поступка (<i>while max_num_iteration</i>):
3.	За сваку јединку у колонији - „спољашња“ петља (<i>for each firefly_i</i>):
4.	За сваку јединку у колонији - „унутрашња“ петља (<i>for each firefly_j</i>):
5.	Израчунати растојање између свих јединки r_{ij}
6.	Ако је $I_i < I_j$, израчунати привлачност β према изразу (7.8) и променити положај свица i у правцу свица j
7.	Одредити нову вредности параметара α
8.	Затварање „унутрашње“ петље (<i>end_for_i</i>)
9.	Затварање „спољашње“ петље (<i>end_for_j</i>)
10.	Одређивање најбољег резултата целокупне колоније (<i>end_while</i>)
11.	Меморисање оптималног резултата (највеће вредности јачине светлости) и оцена перформанси алгоритма

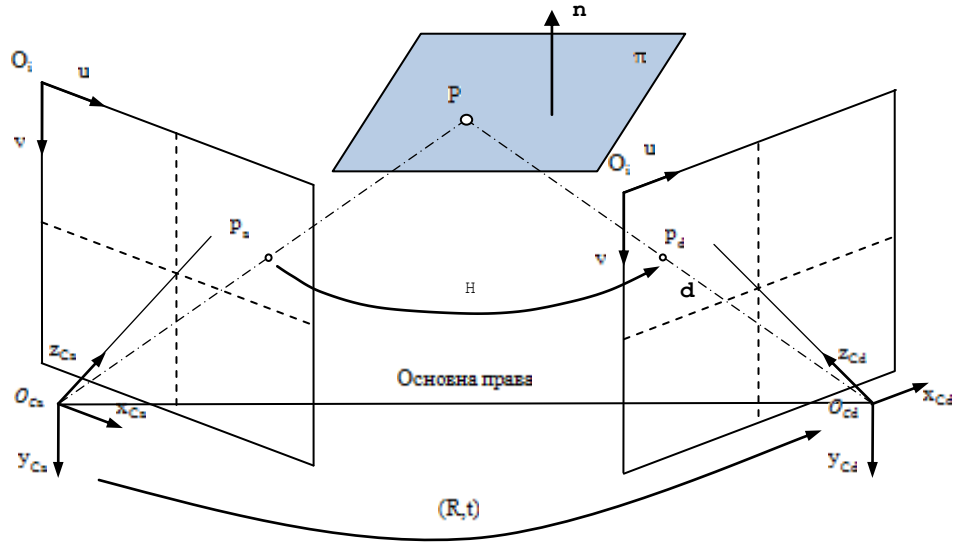
У општем случају разликујемо три модула машинског учења демонстрацијом: модул демонстрација (енгл. *Demonstration Module*), модул машинског учења (енгл. *Learning Module*), и модул научених (оптималних) акција (енгл. *Drive Modul*) интелигентног агента. Модул демонстрација подразумева запис сензорских вредности неопходних за успешно извршавање постављеног задатка. Роботски систем у овом модулу меморише сензорске информације и извршава њима одговарајуће унапред дефинисане акције. Модул машинског учења подразумева процес нелинераног пресликавања скупа улазних података (очитавања са спољашњих и/или унутрашњих сензора) у скуп излазних података (скуп акција робота). Овај модел у описаном техничком решењу представља метахеуристички алгоритам оптимизације колонијом свитаца. Модул научених акција обухвата извршавање сваке од акција и израчунавање грешке са аспекта успешности нелинеарног пресликавања скупова дефинисаних у претходном модулу. Скуп акција са најмањом израчаном грешком представљаће скуп оптималних акција при извршавању разматраног задатка. Детаљније о машинском учењу демонстрацијом могуће је видети у [11].

Теоријске поставке управљачког система на основу хомографских елемената добијених од некалибрисане камере

Сваки карактеристичан објекат $\mathbf{P}$ у простору (енгл. *Feature point*) може се представити у односу на произвољно изабран Декартов координатни систем преко израза $\mathbf{P}=\mathbf{P}(X,Y,Z)$. Перспективном пројекцијом [12] посматраног објекта $\mathbf{P}$ могуће је одредити његове координате у равни слике, у облику $\mathbf{p}=[u \ v \ 1]^T$. Карактеристични објекат уочен у два различита положаја камере повезан је помоћу матрице хомографских елемената $\mathbf{H}$ преко релације:

$$\mathbf{p}_2 = \mathbf{H}_{3 \times 3} \cdot \mathbf{p}_1, \quad (8)$$

где је: $\mathbf{p}_2$ - пројекција објекта у положају 2; $\mathbf{p}_1$ - пројекција истог карактеристичног објекта у положају 1 камере. Да би се применом хомографије могла успоставити веза између два различита положаја камере, неопходно је да карактеристични објекат припада истој равни π у сваком тренутку. С обзиром да се мобилни робот креће у равни, за прорачун матрице хомографије довољно је уочити три различита карактеристична објекта која задовољавају претходни услов [12]. На слици 1 представљене су описане релације између два произвољна положаја камере.



Слика 1. Релације између два произвољна положаја камере.

Нека су матрице пројекција више карактеристичних објеката у два произвољна положаја камере (положаји 1 и 2) дефинисане изразима:

$$\mathbf{P}_1 = \mathbf{K}[\mathbf{I} | \mathbf{0}], \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_2 = \mathbf{K}[\mathbf{R} | -\mathbf{R}\mathbf{c}], \quad (10)$$

где је: $\mathbf{R}$ - матрица ротације камере у положају 2 у односу на положај у претходном тренутку (положај 1); $\mathbf{c}$ - матрица транслације камере у положају 2 у односу на положај 1; $\mathbf{K}$ - калибрациона матрица (матрица унутрашњих параметара камере). Сада се хомографска матрица може изразити преко једначине [3]:

$$\mathbf{H} = \mathbf{K} \left(\mathbf{R} - \mathbf{t} \frac{\mathbf{n}^T}{d} \right) \mathbf{K}^{-1} = \mathbf{K} \left(\mathbf{R} + \mathbf{R}\mathbf{c} \frac{\mathbf{n}^T}{d} \right) \mathbf{K}^{-1} = \mathbf{K}\mathbf{R} \left(\mathbf{I} + \mathbf{c} \frac{\mathbf{n}^T}{d} \right) \mathbf{K}^{-1}. \quad (11)$$

где је: $\mathbf{n} = [n_x \ n_y \ n_z]^T$ - вектор нормале на равни π ; d - растојање објекта P у равни π од координатног система камере (слика 1). С обзиром на раванско кретање мобилног робота (положај робота дефинишемо преко координата x, y, ϕ), матрицу ротације $\mathbf{R}$ и матрицу транслације $\mathbf{c}$ (камере и робота) можемо дефинисати као:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{c} = [x \ y \ 0]^T. \quad (13)$$

Узимајући претходне изразе у обзир, једначина (11) има облик:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

С обзиром на израз (11), елементи хомографске матрице се могу развити на следећи начин:

$$h_{11} = \cos \phi + (x \cos \phi + y \sin \phi) \frac{n_x}{d}, \quad (15)$$

$$h_{12} = \frac{\alpha_x}{\alpha_y} + (x \cos \phi + y \sin \phi) \frac{n_y}{d}, \quad (16)$$

$$h_{13} = \alpha_x \left(\sin \phi + (x \cos \phi + y \sin \phi) \frac{n_z}{d} \right), \quad (17)$$

$$h_{31} = \frac{1}{\alpha_x} \left(-\sin \phi + (-x \sin \phi + y \cos \phi) \frac{n_x}{d} \right), \quad (18)$$

$$h_{32} = \frac{1}{\alpha_y} (-x \sin \phi + y \cos \phi) \frac{n_y}{d}, \quad (19)$$

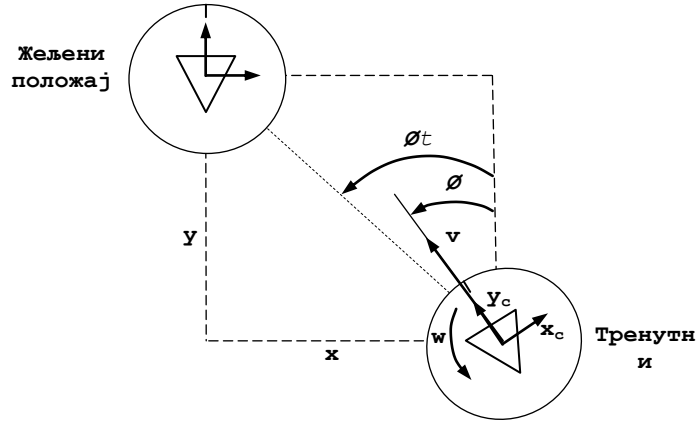
$$h_{33} = \cos \phi + (-x \sin \phi + y \cos \phi) \frac{n_z}{d}, \quad (20)$$

где су α_x и α_y елементи калибрационе матрице $\mathbf{K}$ [12].

Као што је познато, хомографија се може одредити у реалном времену применом неког од алгоритама детекције и упаривања карактеристичних објеката (енгл. *Feature Detection and Matching*) две различите слике. У експерименту представљеном у овом техничком решењу, у ове сврхе је коришћен *SURF* алгоритам [13]. *RANSAC* алгоритмом [12] елиминисани су погрешно упарени објекти.

Промена вектора стања мобилног робота може се изразити преко транслаторне и угаоне брзине које чине вектор улаза (слика 2):

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \phi \\ \cos \phi \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} w. \quad (21)$$



Слика 2. Тренутни и жељени положај мобилног робота.

У случају да су величине ϕ и ϕ_t једнаке, користећи једначине (15)-(20) и уз релацију $x = -y \tan \phi_t$ (слика 2), матрица хомографије (14) се може свести на следећи облик:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \cos \phi_t & 0 & \alpha_x \sin \phi_t \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{\alpha_x} \left(-\sin \phi_t + \frac{y}{\cos \phi_t} \frac{n_x}{d} \right) & \frac{1}{\alpha_y} \frac{y}{\cos \phi_t} \frac{n_y}{d} & \cos \phi_t + \frac{y}{\cos \phi_t} \frac{n_z}{d} \end{bmatrix} \quad (22)$$

На крају праволинијског кретања мобилног робота ($x = y = 0, \phi = \phi_t$) матрица хомографије је облика:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \cos \phi_t & 0 & \alpha_x \sin \phi_t \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{-\sin \phi}{\alpha_x} & 0 & \cos \phi_t \end{bmatrix} \quad (23)$$

Одавде, лако се може показати [14] да је за одређивање линеарне брзине мобилног робота неопходно искористити елементе h_{11} и h_{33} матрице хомографије дате у једначинама (22) и (23) на следећи начин:

$$v = -k_v (h_{11} - h_{33}). \quad (24)$$

Битно је напоменути и то да је, због естимације хомографије скупа карактеристичних објеката, потребно обезбедити довољно велику брзину процесирања информација добијених од камере.

3. ПОСТОЈЕЋЕ СТАЊЕ У СВЕТУ

Методе управљања робота на основу хомографије су заступљене у научној и стручној литератури од 2000. године. Појава овог типа управљања јавила се са напретком система препознавања који омогућавају процесирање информација у реалном времену. Један од пионирских радова третирао је проблем навигације мобилног робота помоћу декомпозиције хомографске матрице [15]. Недостаци овог приступа који се огледају у немогућности одређивања параметара хомографије, превазиђени су применом метода улазно-излазне линеаризације [14,16,17,18]. Три независне технике израчунавања управљачких величина робота на бази хомографије представљене су у [14]. Такође, у истој студији развијени су и алгоритми најкраће путање од почетног до жељеног положаја робота. Проблем детектовања равни хомографије $\mathcal{L}$ елиминисан је развојем хибридног система са две независне фазе управљања [17]. Битно је истаћи и ново истраживање које се базира на дефинисању оптималних примитивних кретања робота, од којих се суперпозицијом може добити произвољни облик сложене трајекторије [16]. Управљање на бази хомографије успешно је примењено и при координацији већег броја мобилних робота у технолошком окружењу [18]. У оквиру овог поглавља, хибридни алгоритам визуелног навођења базира се на хомографији за прорачун трансаторне (линеарне) брзине, док је корекција оријентације робота извршена применом биолошки инспирисаног алгоритма оптимизације.

Теорија ројева (енгл. *Swarm intelligence*) у домену мобилне роботике се најчешће примењује за решавање проблема навигације. Један од првих алгоритама у овој области користи технику оптимизације колонијом мравца (енгл. *Ant colony optimization*) у циљу планирања оптималне путање у окружењу [19]. Иста метода имплементирана је у хибридни управљачки алгоритам како би се одредило глобално и локално решење поменутог проблема [20]. Истраживање представљено у [21] показало је да је ову технику оптимизације могуће користити и за генерисање оптималних фази управљачких система. Комбиновањем система вештачких неуронских мрежа и методе оптимизације роја честица (енгл. *Particle swarm optimization*) развијен је алгоритам навигације нехолономног мобилног робота у статичком окружењу [22]. Новом хибридном *еволуционарном* техником на бази роја честица извршена је оптимизација фази система ради управљања мобилног робота у реалном времену [23]. Генетички алгоритми (енгл. *Genetic algorithms*) су такође заступљени у области когнитивне роботике, и најчешће су коришћени за планирање путање [24], навигацију [25], и/или локализацију мобилног робота [26]. Међутим, у стручној и научној литератури из ове области до данас није представљена примена нових биолошки инспирисаних алгоритама при управљању роботских система. У оквиру овог техничког решења представљен је развијени хибридни управљачки систем мобилног робота који се заснива на искуству и новој методи *оптимизације колонијом свитаца* (енгл. *Firefly algorithm*) [9,10].

4. СУШТИНА ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Праћење жељене трајекторије и визуелно управљање робота у технолошком окружењу решено је применом машинског учења демонстрацијом и биолошки инспирисаног алгорита оптимизације. Три независна модула учења демонстрацијом имплементирана су у оквиру схеме управљања мобилног робота. Модул демонстрација и модул научених акција дефинисани су на исти начин као и код хибридног система управљања који је детаљно описан у техничком решењу [27]. У случају визуелног управљања, сензорске информације (положај карактеристичног објекта на слици) и одговарајуће команде актуатора меморисане су на почетку експеримента. Управљачке величине односе се на корекцију оријентације мобилног робота у технолошком окружењу у тренутку када је се карактеристични објекат не налазу у претходно дефинисаној жељеној области у равни слике. На тај начин обезбеђен је најповољнији положај карактеристичног робота у равни слике. Транслаторна брзина мобилног робота је одређена на основу хомографије односно елемената хомографске матрице. С обзиром да је процес пројектовања овог управљачког подсистема већ приказан у поглављу 2, подразумева се да се транслаторна брзина робота рачуна према изразу (24). Жељена област карактеристичног објекта усвојена је на основу искуства, и њене димензије (ширина x висина) износе 5×5 пиксела [27].

У модулу машинског учења, проблем прескликавања улазног у излазни домен трансформисан је у проблем оптимизације. Интелигентна схема управљања уведена у техничком решењу [27] подразумева да кориговање оријентације робота резултира припадношћу објекта жељеној области у равни слике, али се при том не разматра тачна локација истог објекта унутар те области. Усвајањем жељене области малих димензија делимично се решава овај проблем, с тим да оптималан положај објекта и оптималне вредности команди актуаторима нису загарантоване. Такође, у пракси је потврђено да се робот понаша другачије у различитим итерацијама са истим вредностима управљањима. Ова појава је последица несавршености механичких подсистема мобилног робота, као и реалних услова у технолошком окружењу (утицај подлоге, немерљивих поремећаја, итд.). У циљу елиминације ових неповољности, алгоритам колоније свитаца је имплементиран у хибридни систем управљања односно у модул учења. Модул научених акција подразумева оцену успешности понашања мобилног робота у технолошком окружењу. Улаз у овај блок хибридне схеме управљања представљају разлике у третнутном и жељеном положају карактеристичног објекта, док оптимизоване вредности акција мобилног робота представљају излаз из модула учења. Валидност добијених решења утврђује се на основу понашања робота у реалном времену: за одређени број примера разлике у положају објекта у равни тренутне и циљне слике, неопходно је да управљачке команде обезбеде успешно кориговање оријентације мобилног робота.

Аналогно поступку описаном у [27], најпре је неопходно прикупити податке из реалног окружења. Укупно је меморисано 64 разлике положаја објекта у равни тренутне и циљне слике, и исто толико одговарајућих управљачких команди. Вредности команди актуаторима су затим модификоване тако да подлежу Гаусовој и/или униформној расподели са различитим вредностима варијанси. Овако усвојена управљања су затим тестирана на мобилном роботу у реалном окружењу како би се потврдила чињеница да једној вредности разлике положаја објекта одговарају различите вредности управљачких команди. Оптимизација помоћу биолошки инспирисаног алгорита подразумева проналажење средње вредности опсега управљања за сваку разлику положаја карактеристичног објекта у равни слике.

Навигација робота у технолошком окружењу односи се на праћење трајекторије жељеног облика. Као и у претходном случају, несавршености актуатора робота и услови у технолошком окружењу имају велики утицај на реализацију жељеног понашања робота. У циљу превазилажења ових проблема при управљању робота, оптимална трајекторија је одређена применом концепта машинског учења демонстрацијом и алгорита оптимизације колонијом свитаца. Модул демонстрација обухвата скуп трајекторија неопходних за израчунавање оптималног кретања робота. Трајекторије су генерисане управљањем мобилног робота у технолошком окружењу помоћу команди које подлежу Гаусовој и/или униформној расподели. Након меморисања управљачких величина у овом модулу, започиње процес учења применом алгорита оптимизације. Очекивану вредност оптимизације представља средња вредност управљања робота при реализацији свих трајекторија. Модул научених акција подразумева поступак тестирања кретања мобилног робота у реалном окружењу, користећи команде које су добијене алгоритмом оптимизације. Перформансе робота оцењене су на основу успешности репродуковања жељене трајекторије у статичком окружењу.

5. ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА ПРИМЕНЕ

Нехолономни мобилни робот *KheperaII*, компатибилна камера *CMUcam VISION TURRET-KheCMUCam*, хватач *KheGrip* и десктоп рачунар (3 GHz, 4GB RAM) са *Windows 7* оперативним системом су коришћени у експериментима. Комуникација између рачунара и робота, односно рачунара и камере се извршава помоћу *bluetooth*-а и *USB* адаптера (*RS232 to USB port*), следствено. Шаблон изгледа шаховске табле употребљен је како би се убрзала аквизиција слике и процесирање информација. Резолуција камере је 320x240 пиксела.

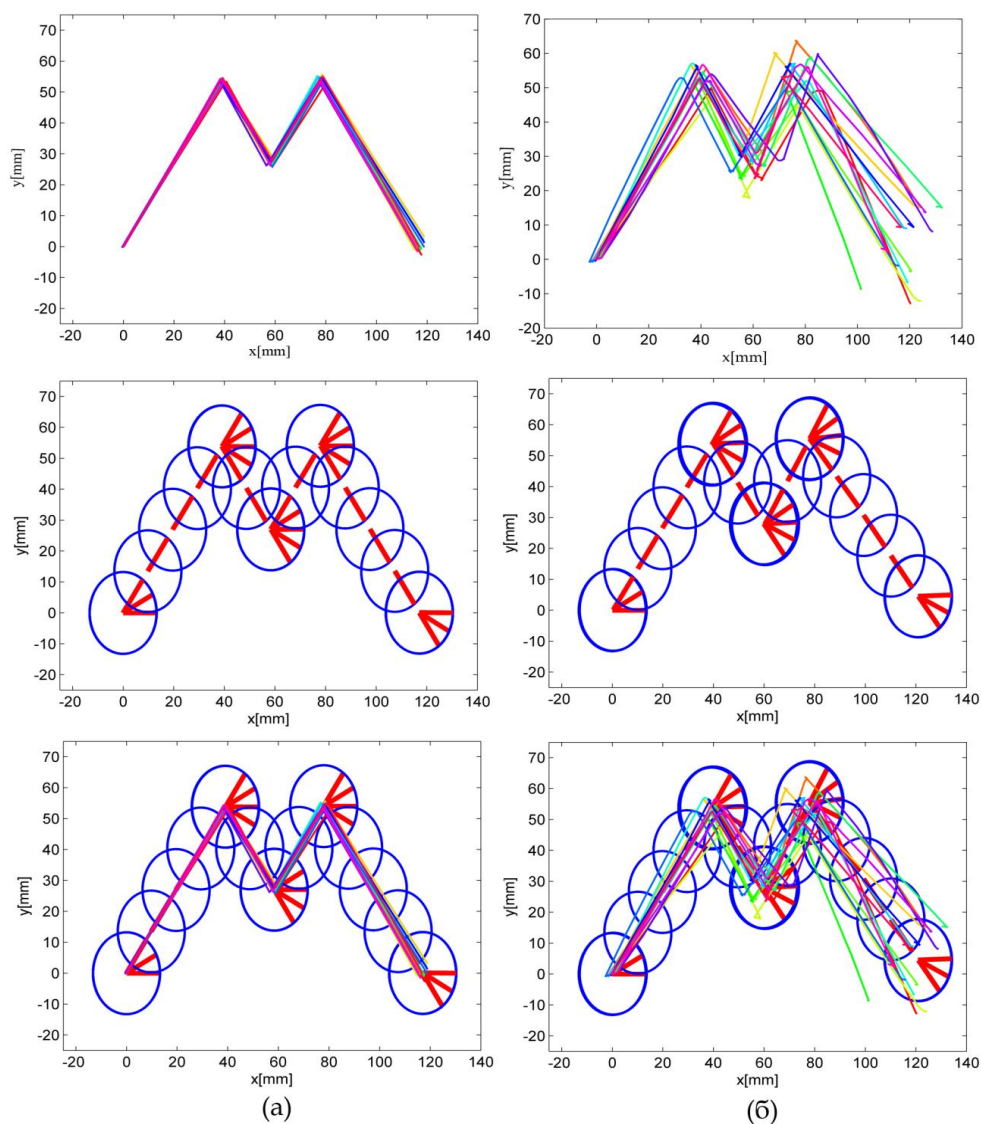
У оквиру овог дела техничког решења приказани су резултати два експеримента интелигентног управљања мобилног робота: (i) праћење жељене трајекторије и (ii) визуелно навођење и праћење трајекторије. Најпре су анализирани перформансе система управљања на примеру праћења трајекторије једноставног облика. Прва фаза експеримента обухвата прикупљање управљачких команди за скуп од 15 трајекторија жељеног облика. Управљања су одређена тако да подлежу Гаусовој и униформној расподели са варијансом од 10 и 30. Аритметичка средина свих генерисаних трајекторија је усвојена као очекивана вредност. Параметри алгоритма усвојени су на следећи начин: $\alpha = 0.2$, $\gamma = 0.97$, $\beta_0 = 1$, број јединки 15 и максималан број итерација 1000. Након машинског учења управљања робота применом биолошки инспирисаног алгоритма оптимизације, у модулу научених акција је тестирано понашање мобилног робота у реалном окружењу. Слика 3 приказује резултате експеримента у технолошком окружењу у случају праћења трајекторије у облику слова *M*.

База и оријентација мобилног робота у свакој итерацији означене су плавом и црвеном бојом, респективно. Са слике 3 се уочава да постоји велика разлика у завршном положају робота у случају имплементације варијансе вероватноће од $\sigma = 30$. Ово значи да робот пратећи неку од ових трајекторија може значајно одсутити од жељене позиције и оријентације на крају експеримента. Увођењем интелигентних техника као што је *алгоритам колоније свитаца* грешка у крајњем положају робота се значајно смањује, и у овом случају износи до 5mm (слика 3(б)). Занимљиво је истаћи и да релативно висока варијанса од $\sigma = 10$ нема велики утицај на кретање робота (слика 3(а)), што је последица облика и мале укупне дужине жељене трајекторије.

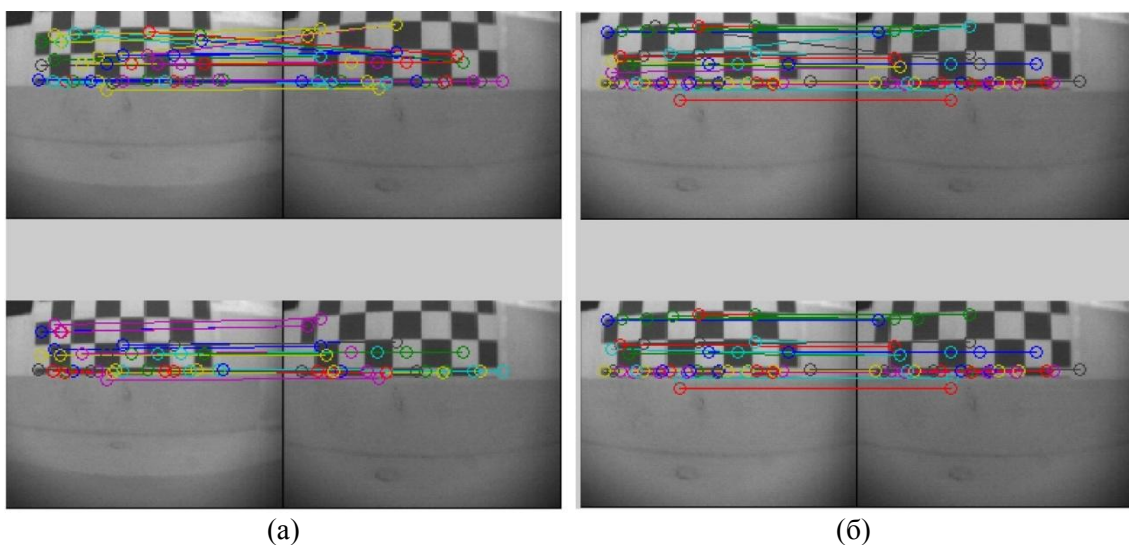
Слика 4 приказује резултате препознавања и упаривања објеката током визуелног навођења мобилног робота. Као и у претходним експериментима *SURF* алгоритам је коришћен за детекцију и повезивање, а *RANSAC* метода за елиминацију погрешно упарених објеката у равни тренутне и циљне слике. Очигледне су разлике у оријентацији робота у првој (слика 4(а)) и последњој (слика 4(б)) итерацији управљања, што указује да је у тим тренуцима неопходно извршити кориговање оријентације робота. Евидентно је и да постоји довољан број препознатих објеката за естимацију матрице хомографије, односно израчунавање управљачких команди. Поређењем слика у последњој итерацији управљања (слика 4(б)) закључује се да постоји минимална разлика у координатама свих карактеристичних објеката, односно да је мобилни робот достигао жељену позицију и оријентацију.

Други експеримент обухвата оба разматрана проблема управљања робота (праћење трајекторије и визуелно навођење). Почетни положај мобилног робота износи

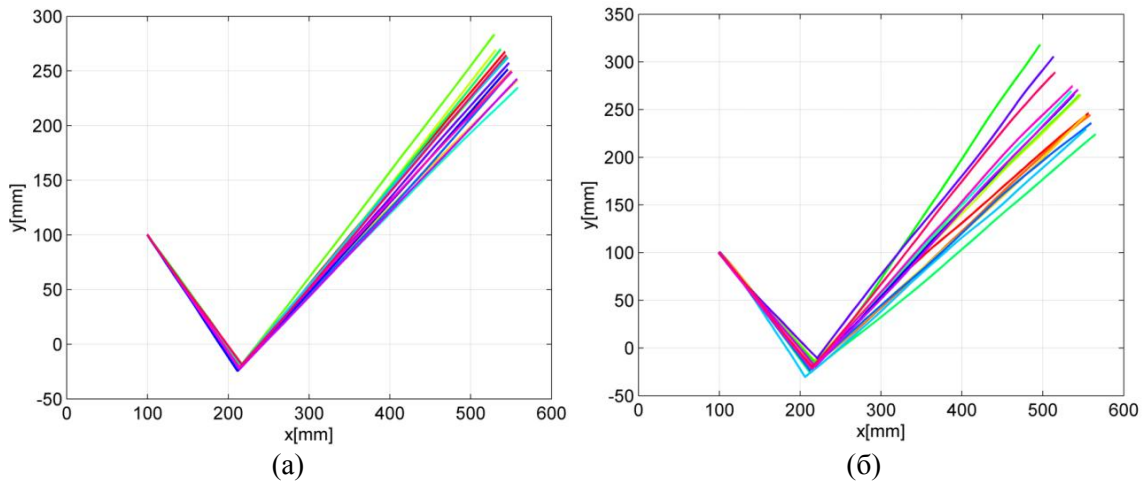
$x = \begin{bmatrix} 100\text{mm} & 100\text{mm} & 40^\circ \end{bmatrix}^T$ у односу на усвојени глобални координатни систем. С обзиром да у овом положају постоји проблем видног поља камере, основни задатак робота је да прати трајекторију жељеног облика од стартне позиције и оријентације до положаја непосредно испред машине у коме је активан подсистем визуелног управљања. На слици 5 приказане су трајекторије робота у случају имплементације варијансе расподеле од $\sigma = 3$ и $\sigma = 10$. За разлику од слике 3, овде је очигледан утицај усвојених вредности варијансе: већ за $\sigma = 3$ завршни положај робота се значајно разликује од оптималног положаја. У случају присуства велике количине шума управљања ($\sigma = 10$, слика 5(б)), кретање робота је потпуно непоуздано са аспекта извршења задатка позиционирања испред машине алатке у технолошком окружењу. Из тог разлога у експерименту приказаном у наставку усвојена је вредност варијансе расподеле вероватноће од $\sigma = 3$.



Слика 3. Резултати алгоритма оптимизације колонијом свитаца приликом праћења трајекторије у облику слова М: (а) Варијанса расподеле вероватноће $\sigma = 10$, (б) Варијанса расподеле вероватноће $\sigma = 30$.

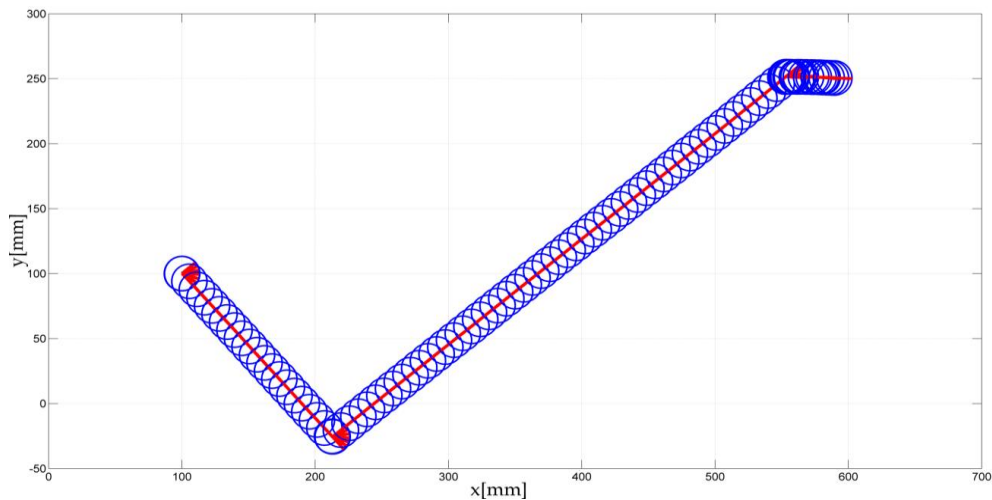


Слика 4. Упарени карактеристични објекти применом SURF алгоритма (горња слика) и преостали објекти након елиминације погрешно упарених елемената применом RANSAC алгоритма (доња слика): (а) у почетном положају, (б) у последњој итерацији управљања.



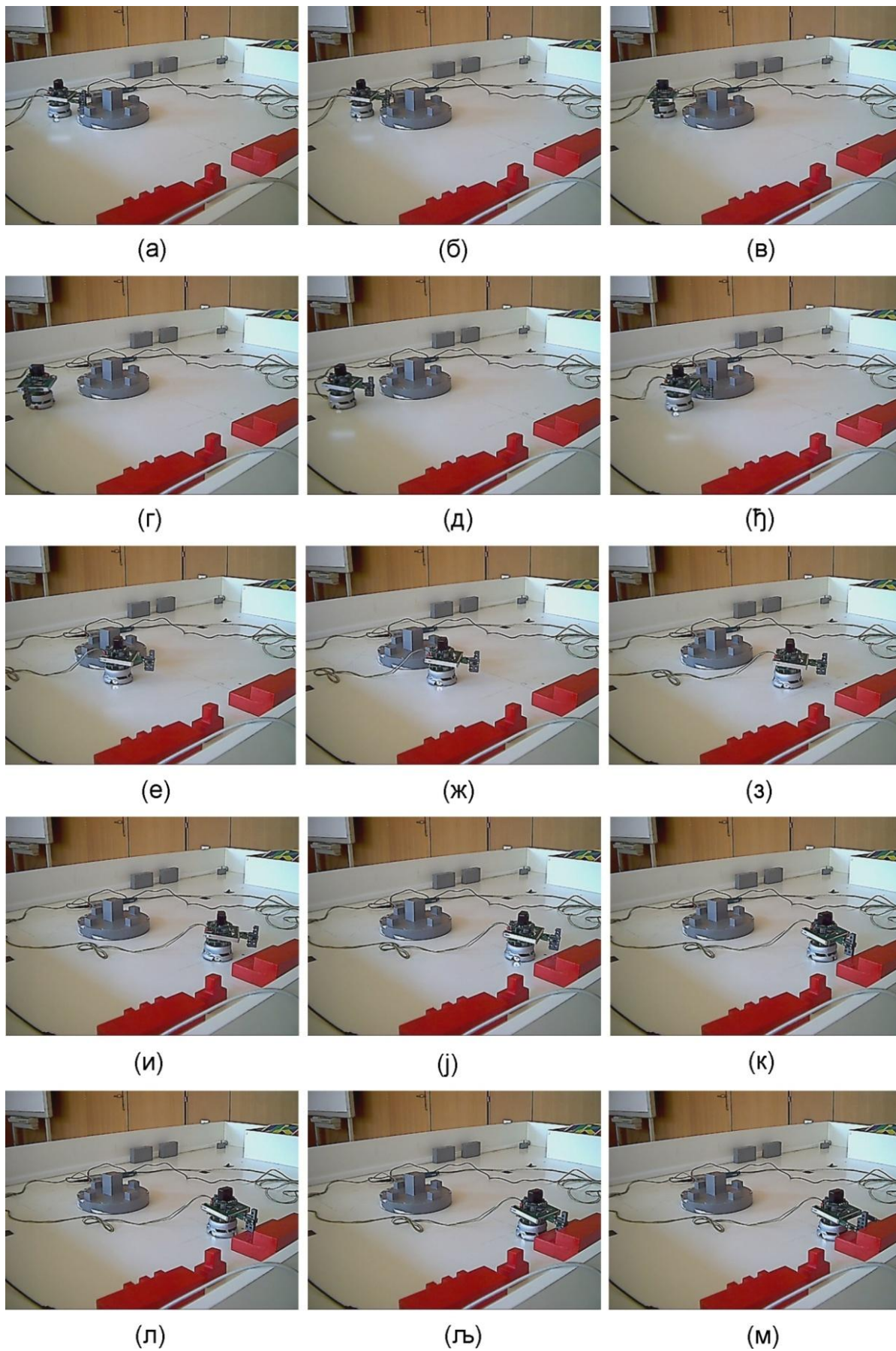
Слика 5. Жељене трајекторије робота у технолошком окружењу: (а) варијанса расподеле вероватноће $\sigma = 3$, (б) варијанса расподеле вероватноће $\sigma = 10$.

Путања робота у X-Y равни на крају експеримента је дата на слици 6. Поредећи слику 5(б) ($\sigma = 3$) и слику 6 уочава се да су алгоритмом колоније свитаца успешно одређене оптималне управљачке команде у свакој итерацији управљања, односно да је задатак праћења путање жељене трајекторије решен у потпуности. Примећује се да робот прати оптималну трајекторију до положаја $x \approx [550\text{mm} \ 250\text{mm} \ 0^\circ]^T$, и да затим започиње визуелно управљање на бази хомографије и биолошки инспирисане методе оптимизације. Такође је уочљиво да се кориговање оријентације током визуелног навођења остварује у итерацијама означеним на слици 4. Финални положај мобилног робота одговара жељеном положају чиме се потврђује робустност развијеног интелигентног система са становишта управљања у реалном времену.



Слика 6. Путања мобилног робота у X-Y равни.

Комплетан експеримент кретања робота по оптималној путањи и управљања на основу информација добијених од камере приказан је на слици 7. Битно је приметити да пре почетка управљања мобилни робот прихвата део који је потребно одложити у захтеваном положају у последњој итерацији управљања. У складу са претходним резултатима, робот се успешно позиционирао на крају кретања и поставио радни предмет на машину у технолошком окружењу. Неопходно је и напоменути да хватач робота није у видном пољу камере, и да он не утиче на реализацију управљања система. Слика 7 (а)-(б) приказује хватање радног предмета непознатих димензија, док је на слици 7 (љ)-(м) уочљиво да мобилни робот позиционира предмет у жељеном положају на изабрану машину алатку. На крају се може закључити да нови емпиријски управљачки систем карактеришу својства *адаптибилности* (доказане су одличне перформансе управљања мобилног робота у реалном времену), *флексибилности* (алгоритам управљања је могуће секвенцијално применити на више технолошких задатака) и *робустности* (није неопходно обезбедити додатну транспортну инфраструктуру у технолошком окружењу).



Слика 7. Манипулација радним предметом у лабораторијском моделу технолошког окружења остварена применом новог емпиријског управљачког алгоритма интелигентног мобилног робота.

6. ЗАКЉУЧАК

Техничко решење (нова метода) се односи на решавање проблема управљања интелигентног мобилног робота применом емпиријске управљачке теорије на бази биолошки инспирисаног алгоритма оптимизације, машинског учења демонстрацијом и хомографије добијене од некалибрисане камере. Алгоритам оптимизације колонијом свитаца (енгл. *Firefly algorithm*) имплементиран је у оквиру машинског учења демонстрацијом у циљу решавања проблема управљања мобилног робота приликом праћења жељене трајекторије и визуелног навођења на основу хомографије. Управљачке команде мобилног робота за реализацију 15 трајекторија жељеног облика меморисане су у модулу демонстрација. Управљања су дефинисана тако да подлежу Гаусовој и униформној расподели са различитим вредностима варијансе ($\sigma = 10$ и $\sigma = 30$ у случају краће трајекторије, и $\sigma = 3$ и $\sigma = 10$ у случају дуге трајекторије). Метода оптимизације је затим искоришћена како би се одредила оптимална трајекторија робота у модулу машинског учења. Експериментална верификација (модул научених акција) подразумева праћење трајекторије у реалном технолошком окружењу. Резултати су потврдили да мобилни робот прати оптималну трајекторију у реалном времену (слика 3 и слика 6), односно да се алгоритам оптимизације може успешно корисити ради одређивања оптималног понашања робота.

Иста техника вештачке интелигенције употребљена је и за визуелно навођење робота. Након достизања жељеног положаја неопходног за почетак управљања на основу информација од камере, навођење робота је остварено применом хомографије и алгоритма оптимизације колонијом свитаца. Као и у [27], у равни слике је дефинисана жељена област изабраног карактеристичног објекта. У случају да се објекат налази унутар жељене области активан је подсистем управљања на бази елемената хомографске матрице (промена позиције), док је у супротном корекција оријентације робота извршена помоћу наведене технике оптимизације. Експериментални резултати су показали да се недостаци управљања на основу хомографије могу елиминисати применом алгоритма оптимизације колонијом свитаца (слика 4), као и да је могуће успешно реализовати прихватање радног предмета и одлагање истог дела на машини алатки у лабораторијском моделу технолошког окружења (слика 7).

Наставак развоја интелигентног емпиријског управљачког система у оквиру планираних активности актуелног пројекта технолошког развоја (евид. бр. *TP35004*) обухватаће следеће правце:

- Неопходно је извршити поређење и упоредну анализу других метахеуристичких метода оптимизације у домену задатака праћења трајекторије и визуелног управљања мобилног робота.
- Поред описаног приступа генерисању управљачких команди, могуће је користити и друге технике вештачке интелигенције као што је *fuzzy* логика у циљу одређивања управљања робота. Истраживање би обухватало и анализу могућности имплементације биолошки инспирисаних алгоритама при оптимизацији функција припадности (енгл. *Membership functions*) *fuzzy* управљачког система.
- Визуелно управљање се може базирати на естимацији фундаменталне матрице и епипола. Алгоритам оптимизације колонијом свитаца могуће је искористити за решавање проблема дегенерације епипола услед мале разлике између тренутне и жељене слике. Овако дефинисан хибридни систем управљања је потребно поредити са интелигентним системом представљеним у [27].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Russel, S., Norvig, P., Artificial intelligence: a modern approach, 3rd Edition, Prentice Hall, 2010.
- [2] Vuković, N., Miljković, Z., Mitić, M., Petrović, M., Novi algoritam za simultano ocenjivanje položaja mobilnog robota i položaja karakterističnih objekata baziran na neuronskom linearizovanom Kalmanovom filtru i senzorskoj informaciji dobijenoj od kalibrisane kamere (nova metoda: koja rešava problem simultanog ocenjivanja položaja mobilnog robota i karakterističnih objekata u tehnološkom okruženju tokom obavljanja transportnog zadatka u okviru sistema unutrašnjeg transporta sirovina, polufabrikata, materijala i gotovih delova, razvijana u projektu TR-35004 MPNiTR Vlade Republike Srbije), 2012.
- [3] Forsyth, D. A., Ponce, J., Computer vision – a modern approach, 2nd Edition, Pearson, 2012.

- [4] Mitić, M., Miljković, Z., Vuković, N., Lazarević, I., Visual Control of a Mobile Robot Using Homography and Learning from Demonstration Methodology, Proceedings of the 4th Serbian Congress on Theoretical and Applied Mechanics, pp. 675-680, Vrnjačka Banja, Serbia, 4-7 June, 2013.
- [5] Nolfi, S., Floreano, D., Floreano, D., Evolutionary robotics: The biology, intelligence, and technology of self-organizing machines, The MIT press, 2000.
- [6] Pfiefer, R., Understanding intelligence, The MIT Press, 2001.
- [7] Kennedy, J. F., Kennedy, J., Eberhart, R. C., Swarm intelligence, Morgan Kaufmann, 2001.
- [8] Kochenberger, G. A. (Ed.), Handbook in Metaheuristics, Springer, 2003.
- [9] Yang, X. S., Firefly algorithms for multimodal optimization. In: Stochastic algorithms: foundations and applications, Springer Berlin Heidelberg, pp. 169-178, 2009.
- [10] Yang, X. S., Nature-inspired metaheuristic algorithms, 2nd Edition, Luniver Press, 2010.
- [11] Argall B., Chernova S., Veloso M., Browning, B., *A survey of robot learning from demonstration*, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 57, No. 5, pp. 469-483, 2009.
- [12] Szeliski R., Computer vision: Algorithms and applications, Springer, 2011.
- [13] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, Van Gool, L., *SURF: Speeded Up Robust Features*, Computer Vision and Image Understanding, Vol. 110, No. 3, pp. 346-359, 2008.
- [14] López-Nicolás G., Guerrero JJ., Sagüés C., *Shortest path homography-based visual control for differential drive robots*, I-Tech Educ. & Publish. (Ed. Obinata G. & Dutta A.), pp. 583-596, 2007.
- [15] Fang, Y., Dixon, W. E., Dawson, D. M., Chawda, P., Homography-based visual servo regulation of mobile robots, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, Vol. 35, No. 5, pp. 1041-1050, 2005.
- [16] López-Nicolás, G., Gans, N. R., Bhattacharya, S., Guerrero, J. J., Sagüés, C., Hutchinson, S., Homography-based control scheme for mobile robots with nonholonomic and field-of-view constraints, IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics, Vol. 40, No.4, pp. 1115–1127, 2010.
- [17] López-Nicolás, G., Sagüés, C., Guerrero, J. J., Homography-based visual control of nonholonomic vehicles, In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1703–1708, 2007.
- [18] López-Nicolás, G., Aranda, M., Mezouar, Y., Sagüés, C., Visual control for multi-robot organized rendezvous, IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics, Vol. 42, No.4, pp. 1155–1168, 2012.
- [19] Fan, X., Luo, X., Yi, S., Yang, S., Zhang, H., Optimal path planning for mobile robots based on intensified ant colony optimization algorithm, In: Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing, Vol. 1, pp. 131-136, 2003.
- [20] Mei, H., Tian, Y., Zu, L., A hybrid ant colony optimization algorithm for path planning of robot in dynamic environment, International Journal of Information Technology, Vol. 12, No. 3, pp. 78-88, 2006.
- [21] Garcia, M. A., Montiel, O., Castillo, O., Sepúlveda, R., Melin, P., Path planning for autonomous mobile robot navigation with ant colony optimization and fuzzy cost function evaluation, Applied Soft Computing, Vol. 9, No. 3, 1102-1110, 2009.
- [22] Li, Y., Chen, X., Mobile robot navigation using particle swarm optimization and adaptive NN, In: Advances in Natural Computation, pp. 628-631, Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [23] Juang, C. F., Chang, Y. C., Evolutionary-group-based particle-swarm-optimized fuzzy controller with application to mobile-robot navigation in unknown environments, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 19, No. 2, 379-392, 2011.
- [24] Han, W. G., Baek, S. M., Kuc, T. Y., Genetic algorithm based path planning and dynamic obstacle avoidance of mobile robots, In: IEEE International Conference on Computational Cybernetics and Simulation, Vol. 3, pp. 2747-2751, 1997.
- [25] Ram, A., Boone, G., Arkin, R., Pearce, M., Using genetic algorithms to learn reactive control parameters for autonomous robotic navigation, Adaptive Behavior, Vol. 2, No. 3, 277-305, 1994.
- [26] Moreno, L., Armingol, J. M., Garrido, S., De La Escalera, A., Salichs, M. A., A genetic algorithm for mobile robot localization using ultrasonic sensors, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 34, No. 2, 135-154, 2002.
- [27] Mitić, M., Miljković, Z., Vuković, N., Babić, B., Empirijsko upravljanje inteligentnog mobilnog robota na bazi mašinskog učenja demonstracijom i homografije dobijene od nekalibrisane kamere (nova metoda razvijana u projektu TR-35004 MPNiTR Vlade Republike Srbije), 2012.

Одлуком Истраживачко-стручног већа Машинског факултета у Београду бр. 2407/2 од 05.12.2013. године именовани смо за рецензенте нове методе под називом „Праћење жељене трајекторије и визуелно навођење мобилног робота у технолошком окружењу на бази биолошки инспирисаног метахеуристичког алгоритма” аутора: Марко Митић, дипл. инж. маш., проф. др Зоран Миљковић, др Најдан Вуковић, научни сарадник и мр Иван Б. Лазаревић, дипл. инж. маш.. На основу предлога и након анализе методе подносимо следећи:

ИЗВЕШТАЈ

Нова метода (M85) под називом „Праћење жељене трајекторије и визуелно навођење мобилног робота у технолошком окружењу на бази биолошки инспирисаног метахеуристичког алгоритма” представљена је на 14 страница А4 формата, коришћењем Times New Roman фонта величине 11 pt, једноструког прореда. Опис методе садржи 24 једначине, 7 слика и 1 табеларни приказ резултата примене нове методе представљених у следећих шест тематских целина, уз списак коришћене литературе:

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

Техничко решење припада области производних технологија и директно се односи на решавање проблема праћења жељене трајекторије и визуелног управљања интелигентног мобилног робота применом емпијске управљачке теорије. Развијени управљачки систем обухвата интеграцију интелигентног система базираног на метахеуристичком алгоритму оптимизације и емпијски прикупљеним сензорским информацијама, машинском учењу демонстрацијом и управљачког подсистема заснованог на елементима хомографске матрице добијене од некалибрисане камере.

У оквиру другог поглавља образложен је технички проблем и дате су теоријске основе система управљања за оба разматрана проблема. У основим цртама представљене су теоријске поставке управљачких система на бази: (i) биолошки инспирисаног алгоритма оптимизације колонијом свитаца (уз теоријску поставку машинског учења демонстрацијом), као и (ii) хомографских елемената добијених од некалибрисане камере. Приказане су основе теорије ројева, са посебним акцентом на имплементираном метахеуристичком алгоритму оптимизације колонијом свитаца. Такође, описана су три основна модула машинског учења демонстрацијом који су, заједно са алгоритмом оптимизације, коришћени за убрзање конвергенције развијеног емпијског алгоритма ка оптималном решењу. Изведен је израз за израчунавање трансаторне брзине мобилног робота на основу хомографије, уз приказ основних геометријских релација између два произвољна положаја камере. Модул демонстрација подразумева запис сензорских вредности неопходних за успешно извршавање постављеног задатка; модул машинског учења односи се на процес нелинераног пресликавања скупа улазних података (очитавања са спољашњег сензора - камере) у скуп излазних података (скуп акција робота); модел научених акција обухвата извршавање сваке од акција и израчунавање грешке са аспекта успешности нелинеарног пресликавања скупова дефинисаних у претходном модулу. Такође, дата је математичка подлога оба управљачка подсистема уз навођење референтне литературе.

У трећем поглављу наведено је постојеће стање у свету. Иако не постоји много примера интеграције дефинисаних управљачких подсистема, актуелни резултати истраживања су детаљно описани. Дванаест референтних научних публикација је издвојено, приказујући релевантна истраживања од 1994. године до данас. Описани су научни радови који решавају проблем праћења жељене трајекторије користећи технике оптимизације које су базиране на алгоритму мравље колоније, генетичком алгоритму, као и методи оптимизације ројем честица. Такође, представљени су најзначајнији научни радови у области визуелног управљања мобилног робота на бази хомографије.

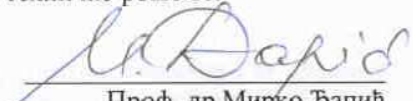
Четврто поглавље садржи суштину техничког решења приказану кроз концепцијско решење емпиријског управљачког система. Несавршености актуатора робота и услови у технолошком окружењу имају велики утицај на реализацију жељеног понашања робота. У циљу превазилажења ових проблема при управљању робота, оптимална трајекторија је одређена применом концепта машинског учења демонстрацијом и алгоритма оптимизације колонијом свитаца. Трајекторије су генерисане управљањем мобилног робота у технолошком окружењу помоћу команди које подлежу Гаусовој и/или униформној расподели. Након меморисања управљачких величина у овом модулу, започиње процес учења применом алгоритма оптимизације колонијом свитаца. Модул научених акција подразумева поступак тестирања кретања мобилног робота у реалном окружењу, користећи команде које су добијене алгоритмом оптимизације. У случају визуелног управљања, трансляторна брзина мобилног робота је одређена на основу хомографије односно елемената хомографске матрице, док је алгоритам оптимизације колонијом свитаца коришћен за генерисање управљачких величина за корекцију оријентације мобилног робота у лабораторијском моделу технолошког окружења.

Пето поглавље приказује експерименталну верификацију развијеног управљачког система на мобилном роботу *Khepera II* – *KheIIBase* са компатибилном камером *CMUcam VISION TURRET-KheCMUcam* и хватачем *KheGrip*. Комуникација између десктоп рачунара и робота, односно рачунара и камере се извршава помоћу *bluetooth*-а и *USB* адаптера (*RS232 to USB port*), следствено. Приказани су резултати два експеримента интелигентног управљања мобилног робота у домену унутрашњег транспорта материјала: (i) праћење жељене трајекторије и (ii) визуелно навођење и праћење трајекторије. Експериментални резултати су показали да је праћење жељене трајекторије и визуелно управљање на основу хомографије могуће успешно реализовати применом алгоритма оптимизације колонијом свитаца, као и да је могуће остварити манипулацију радног предмета у лабораторијском моделу технолошког окружења.

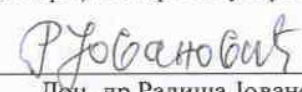
У оквиру закључка наглашена је предност развијеног емпиријског управљачког система у односу на позната постојећа решења. Потврђено је да нови емпиријски управљачки систем на бази метакеуристичког алгоритма оптимизације колонијом свитаца и хомографије карактеришу својства *адаптибилности* (доказане су одличне перформансе управљања мобилног робота у реалном времену), *флексибилности* (алгоритам управљања је могуће секвенцијално применити на више технолошких задатака) и *робустности* (није неопходно обезбедити додатну транспортну инфраструктуру у технолошком окружењу). Такође, у кратким цртама представљени су правци будућих истраживања на актуелном пројекту технолошког развоја (евид. бр. *TP35004*). У складу са датом анализом предлога техничког решења, као именовани рецензенти дајемо следеће

МИШЉЕЊЕ

Аутори нове методе (M85) под називом „Праћење жељене трајекторије и визуелно навођење мобилног робота у технолошком окружењу на бази биолошки инспирисаног метакеуристичког алгоритма” су на јасан начин описали концепцијско решење управљања мобилног робота на бази емпиријске управљачке теорије, алгоритма оптимизације колонијом свитаца, као и информација добијених од камере приликом решавања задатка манипулације радним предметима и навигације у лабораторијском моделу технолошког окружења. Резултати остварени применом ове нове методе указују на то да постоји очит допринос постојећем стању развоја, а потврђују и то да је омогућен једноставан и ефикасан начин реализације интелигентног управљачког система на бази емпиријски прикупљених сензорских информација. На основу увида у предлог нове методе и остварене резултате предлажемо Истраживачко-стручном већу Машинског факултета у Београду да се нова метода под називом „Праћење жељене трајекторије и визуелно навођење мобилног робота у технолошком окружењу на бази биолошки инспирисаног метакеуристичког алгоритма” прихвати као ново техничко решење.



Проф. др Мирко Бапић
Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву



Док. др Радиша Јовановић
Универзитет у Београду-Машински факултет

Београд, 16. 01. 2014. године

Предмет: Мишљење о реализацији пројекта „Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима“ (ТР-35004) у периоду 01.01.2013.-31.12.2013. (трећа година финансирања)

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.

У овој истраживачкој години настале су две оригиналне методологије. Прва обухвата интеграцију интелигентног система базираног на метахеуристичком алгоритму оптимизације и емпиријски прикупљеним сензорским информацијама, машинском учењу демонстрацијом и управљачког подсистема заснованог на елементима хомографске матрице добијене од некалибрисане камере. Техничко решење (нова метода) се односи на решавање проблема управљања интелигентног мобилног робота применом емпиријске управљачке теорије на бази биолошки инспирисаног алгоритма оптимизације, машинског учења демонстрацијом и хомографије добијене од некалибрисане камере.

У оквиру друге методе приказан је хибридни алгоритам за оптимизацију флексибилних технолошких процеса, базиран на интеграцији генетичког алгоритма и алгоритма симулираног каљења. Развијени алгоритам обухвата две фазе у решавању разматраног комбинаторно-оптимизационог проблема. Прва фаза подразумева примену генетичких алгоритама у иницијалном глобалном генерисању „добрих“ технолошких процеса. На бази одабраних технолошких процеса, у другој фази хибридног метахеуристичког алгоритма примењен је алгоритам симулираног каљења, који се користи за локално претраживање „добрих“ технолошких процеса и добијање оптималних и/или приближно оптималних флексибилних технолошких процеса обраде дела.

Након увида у примењивост нових техничких решења (нових метода), 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.

Београд, 17. 01. 2014. 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.

[Signature]

Др доц Драгомир Стаменковић, дипл. маш. инж.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
БРОЈ: 2407/3
ДАТУМ: 19.12.2013.

На основу захтева проф.др Бојана Бабића бр. 2407/1 од 04.12.2013. године, одлуке о именовању рецензената и чл. 63. Статута Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 19.12.2013. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Прихвата се Техничко решење под насловом: **„Праћење жељене трајекторије и визуелно навођење мобилног робота у технолошком окружењу на бази биолошки инспирисаног метахеуристичког алгоритма”**, чији су аутори: Марко Митић дипл.инж.маш., проф.др Зоран Миљковић, др Најдан Вуковић, научни сарадник и мр Иван Лазаревић, дипл.инж.маш., а позитивну рецензију поднели: др Мирко Ђапић, Факултет за машинство и грађевинарство, Краљево и доц.др Радиша Јовановић.

Одлуку доставити: Министарству просвете, науке и технолошког развоја РС, ауторима, рецензентима и архиви Факултета ради евиденције.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА



Проф.др Милорад Милованчевић