

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -  
БРОЈ: 2401/2  
ДАТУМ: 14.12.2012.

На основу захтева руководиоца пројекта проф.др Бојана Бабића бр. 2401/1 од 13.12.2012. године и чл. 12.5 Статута Машинског факултета, Истраживачко стручно веће на седници од 13.12.2012. године, донело је следећу

### ОДЛУКУ

Да се за рецензенте Техничког решења рађеног у оквиру пројекта ТР 35004, под насловом: **„Емпиријско управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и хомографије добијене од некалибрисане камере“**, чији су аутори: Марко Митић, дипл.инж.маш., проф.др Зоран Миљковић, Најдан Вуковић, дипл.инж.маш. и проф.др Бојан Бабић, именују:

- проф.др Жарко Ћојбашић, Машински факултет у Нишу 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

**Емпиријско управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и хомографије добијене од некалибрисане камере**

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

**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 машинског учења демонстрацијом и хомографије добијене од некалибрисане камере, и може се уврстити у напредне производне технологије. Достигнућа науке и технике почетком 21. века допринела су интензивирању развоја индустријских мобилних робота (и робоколица) који, поред извршавања постављених технолошких задатака, могу да уче и да се прилагођавају стохастичким променама у радном окружењу, посебно коришћењем прикупљених сензорских информација. Овом новом методом представљено је решење управљања мобилног робота помоћу информација добијених од компатибилне камере за време извршавања задатка навигације у оквиру система унутрашњег транспорта сировина, материјала и готових делова. Развијени управљачки систем обухвата интеграцију интелигентног система базираног на емпиријски прикупљеним сензорским информацијама и машинском учењу демонстрацијом, и управљачког подсистема заснованог на елементима хомографске матрице добијене од некалибрисане камере. Резултати примене описаног техничког решења обухватају експерименталну верификацију емпиријског управљачког система на мобилном роботу *Khepera II – KheIIBase* са компатибилном камером *CMUCam VISION TURRET–KheCMUCam* у лабораторијском моделу технолошког окружења.

**2. ТЕХНИЧКИ ПРОБЛЕМ**

Управљачки системи базирани на информацијама од камере подразумевају коришћење техника компјутерског (машинског) гледања у сврху управљања кретања робота [1]. Данас, навигација мобилног робота (и робоколица) коришћењем сензорских информација од камере најчешће подразумева употребу епиполарне геометрије која представља директну везу између два различита положаја камере [2]. Највећи недостатак овог приступа је нетачна естимација фундаменталне матрице и епиопола [3] у случају мале разлике између тренутног и жељеног положаја (позиције и оријентације) камере. Као решење овог проблема намеће се употреба хомографије са циљем дефинисања геометријских релација између два произвољна положаја камере у простору. Хомографија дефинише димензије уочених карактеристичних објеката са слике у тренутку  $t + \Delta t$ , у случају да је познато како су они изгледали у тренутку  $t$ . На тај начин, дефинисањем почетне и циљне слике (односно почетног и жељеног положаја камере) могуће је одредити матрицу хомографских елеманата неопходних за прорачун линеарне брзине мобилног робота. Такође, за реализацију развијеног управљачког система није неопходно извршити декомпозицију хомографије, што представља значајну предност у односу на друге сличне управљачке системе индустријских мобилног робота.

За прорачун угаоне брзине интелигентног мобилног робота коришћен је емпиријски управљачки систем на бази машинског учења демонстрацијом (енгл. *Learning from Demonstrations*) [4]. Машинско учење демонстрацијом представља нову класу машинског учења у којој демонстратор (човек или друга машина) демонстрира одговарајуће акције сходно тренутном стању система и окружења, са крајњим циљем успешног извршења постављеног задатка. У случају машинског учења роботског система, разликују се две схеме са становишта типа/класе робота демонстратора:

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

- Хомогена схема учења демонстрацијом, код које је робот демонстратор исте структуре као и робот који се обучава;
- Нехомогена схема учења демонстрацијом, код које се робот демонстратор разликује од робота који се обучава.

У разматраном случају коришћена је хомогена схема интегрисана са системом вештачких неуронских мрежа у циљу убрзања конвергенције развијеног емпиријског управљачког алгоритма ка оптималном решењу.

На самом почетку извештаја представљене су теоријске основе проблема. У трећем поглављу, развијени емпиријски управљачки систем на бази машинског учења демонстрацијом и хомографским елементима упоређен је са сродним системима у свету. Суштина техничког решења представљена је у четвртом 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

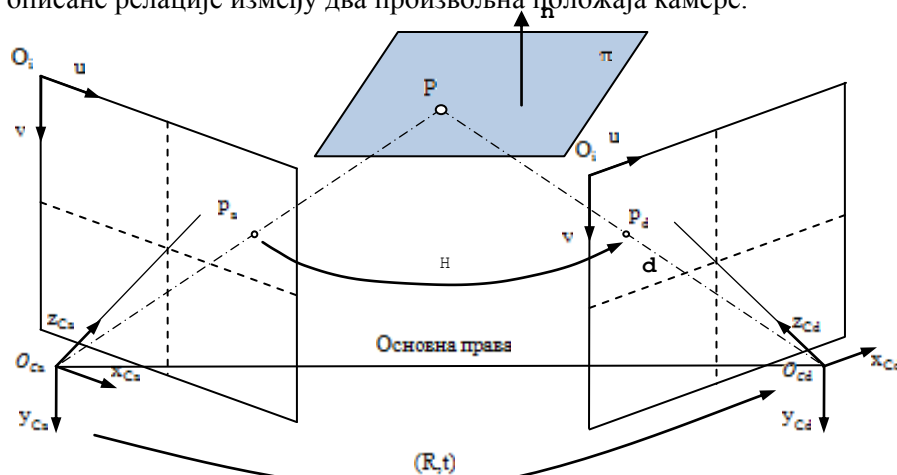
С обзиром да се развијени емпиријски управљачки систем састоји од два управљачка подсистема и параметра активације који указује на то који је од њих активан у посматраном тренутку, у овом одељку ће посебно бити описан сваки од подсистема, као и њихова интеграција са аспекта разматраног задатка навигације у технолошком окружењу.

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

Сваки карактеристичан објекат  $P$  у простору (енгл. *Feature point*) може се представити у односу на произвољно изабран Декартов координатни систем преко израза  $P=P(X,Y,Z)$ . Перспективном пројекцијом [3] посматраног објекта  $P$  могуће је одредити његове координате у равни слике, у облику  $p=[u \ v \ 1]^T$ . Карактеристични објекат уочен у два различита положаја камере повезан је помоћу матрице хомографских елемената  $H$  преко релације:

$$p_2 = H_{3 \times 3} \cdot p_1, \quad (1)$$

где је:  $p_2$  - пројекција објекта у положају 2;  $p_1$  - 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  $\pi$  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 [3]. 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:

$$\mathbf{P}_1 = \mathbf{K}[\mathbf{I} | 0], \quad (2)$$

$$\mathbf{P}_2 = \mathbf{K}[\mathbf{R} | -\mathbf{R}\mathbf{c}], \quad (3)$$

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]:

$$\mathbf{H} = \mathbf{K} \left( \mathbf{R} - \mathbf{t} \frac{\mathbf{n}^T}{d} \right) \mathbf{K}^{-1} = \mathbf{K} \left( \mathbf{R} + \mathbf{R}\mathbf{c} \frac{\mathbf{n}^T}{d} \right) \mathbf{K}^{-1} = \mathbf{K}\mathbf{R} \left( \mathbf{I} + \mathbf{c} \frac{\mathbf{n}^T}{d} \right) \mathbf{K}^{-1}. \quad (4)$$

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

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{c} = [x \ y \ 0]^T. \quad (6)$$

Узимајући претходне изразе у обзир, једначина (4) има облик:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

С обзиром на израз (4), елементи хомографске матрице се могу развити на следећи начин:

$$h_{11} = \cos \phi + (x \cos \phi + y \sin \phi) \frac{n_x}{d}, \quad (8)$$

$$h_{12} = \frac{\alpha_x}{\alpha_y} + (x \cos \phi + y \sin \phi) \frac{n_y}{d}, \quad (9)$$

$$h_{13} = \alpha_x \left( \sin \phi + (x \cos \phi + y \sin \phi) \frac{n_z}{d} \right), \quad (10)$$

$$h_{31} = \frac{1}{\alpha_x} \left( -\sin \phi + (-x \sin \phi + y \cos \phi) \frac{n_x}{d} \right), \quad (11)$$

$$h_{32} = \frac{1}{\alpha_y} (-x \sin \phi + y \cos \phi) \frac{n_y}{d}, \quad (12)$$

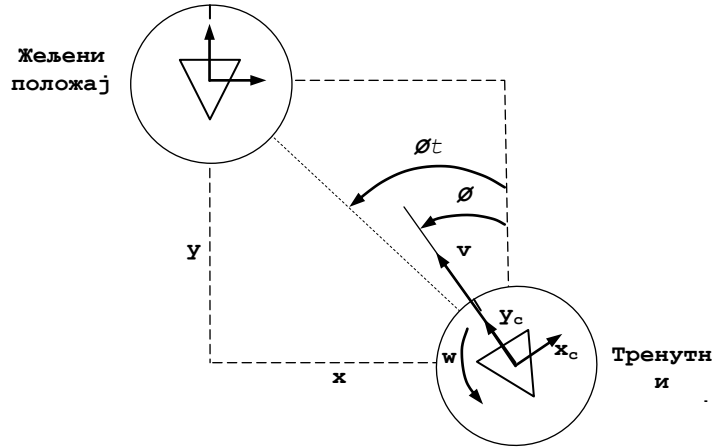
$$h_{33} = \cos \phi + (-x \sin \phi + y \cos \phi) \frac{n_z}{d}, \quad (13)$$

где су  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$  елементи калибрационе матрице  $\mathbf{K}$  [3].

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 [5]. *RANSAC* алгоритмом [3] елиминисани су погрешно упарени објекти.

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

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \phi \\ \cos \phi \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} w. \quad (14)$$



Слика 2: Тренутни и жељени положај мобилног робота

У случају да су величине  $\phi$  и  $\phi_t$  једнаке, користећи једначине 8-13 и уз релацију  $x = -y \tan \phi_t$  (слика 2), матрица хомографије (7) се може свести на следећи облик:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \cos \phi_t & 0 & \alpha_x \sin \phi_t \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{\alpha_x} \left( -\sin \phi_t + \frac{y}{\cos \phi_t} \frac{n_x}{d} \right) & \frac{1}{\alpha_y} \frac{y}{\cos \phi_t} \frac{n_y}{d} & \cos \phi_t + \frac{y}{\cos \phi_t} \frac{n_z}{d} \end{bmatrix} \quad (15)$$

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

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \cos \phi_t & 0 & \alpha_x \sin \phi_t \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{-\sin \phi}{\alpha_x} & 0 & \cos \phi_t \end{bmatrix} \quad (16)$$

Одавде, лако се може показати [6] да је за одређивање линеарне брзине мобилног робота неопходно искористити елементе  $h_{11}$  и  $h_{33}$  матрице хомографије дате у једначинама (15) и (16) на следећи начин:

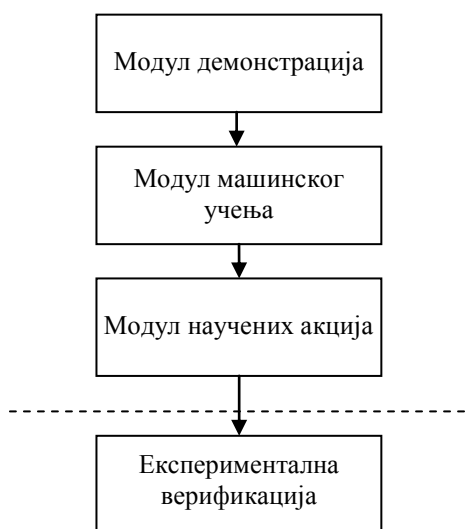
$$v = -k_v (h_{11} - h_{33}). \quad (17)$$

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

Према неким истраживањима [2], фреквенција једне итерације која обухвата аквизицију једне слике и детекцију и упаривање карактеристичних објеката две различите слике сматра се спором ако не прелази границу од 30 Hz. С обзиром да у нашем случају фреквенција износи око 0.05 Hz, интелигентни подсистем базиран на машинском учењу демонстрацијом је неопходно интегрисати у развијени управљачки систем на бази елемената хомографске матрице, у циљу успешног извршавања постављеног задатка навигације.

### Теоријске поставке управљачког система базираног на машинском учењу демонстрацијом

Машинско учење демонстрацијом представља релативно нову класу машинског учења [4]. 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 нелинеарног 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 систем вештачких неуронских мрежа (ВНМ). 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 израчунавом грешком представљаће скуп оптималних акција при извршавању разматраног задатка. Детаљније о машинском учењу демонстрацијом могуће је видети у [4]. На слици 3 дата је веза између описаних модула.



Слика 3: Релације између модела машинског учења демонстрацијом

Вештачке неуронске мреже као универзални апроксиматори комплексних функција, представљају парадигму вештачке интелигенције која се базира на паралелном процесирању по угледу на људски мозак [7]. ВНМ могу да уче, да се прилагоде окружењу проблема који се разматра, да установе модел у ситуацијама када су правила непозната и/или су неодређена и/или су непотпуна. У случају машинског учења демонстрацијом ВНМ се користе (у модулу машинског учења) за апроксимацију нелинеарне функције пресликавања улазног вектора сензорских информација (координате карактеристичних објеката са слика добијених од камере) у излазни вектор научених акција (вредности угаоне брзине у посматраном тренутку). Обучавање ВНМ је вршено помоћу Левенберг-Маркеовог алгоритма учења [7]. Укупно је обучено 18 неуронских мрежа различите архитектуре (једнослојне, двослојне и трослојне мреже), а најбоља ВНМ одређена је на основу најмање вредности средње квадратне грешке (MSE). Скуп обучавајућих парава подељен је на „скуп за тренинг“ и „скуп за тест“ у односу 7:3, и то случајним одабиром емпиријских (сензорских) вредности. Битно је напоменути и то да се обучавање за једну ВНМ завршавало у случају да је грешка обучавања мања од  $10^{-5}$ , односно ако је број итерација обучавања већи од 1000.

### 3. ПОСТОЈЕЋЕ СТАЊЕ У СВЕТУ

У стручној литератури не постоји много примера који комбинују машинско учење демонстрацијом и управљање базирано на информацијама од камере. Један од првих научних радова у овој области односи се на обучавање роботске руке применом учења демонстрацијом уз помоћ информација од стерео система машинског гледања [8]. Слично овом приступу, праћење трајекторије карактеристичног објекта помоћу камере која је инсталирана на хуманоидни робот са 37 степени слободе извршено је применом машинског учења демонстрацијом [9]. У оба претходна случаја робот успешно учи оптимално понашање директним посматрањем извршених акција човека-демонстратора. Важан сегмент истраживања односи се и на употребу различитих спољашњих сензора са циљем обезбеђивања додатних информација о процесу који је неопходно научити. У [10] хватање препознатог објекта омогућено је помоћу информација добијених од камере, машинског учења демонстрацијом, и сензора постављених на човеку-демонстратору. Показано је да је опсервацијама покрета човека, уз развој комплексних математичко-алгоритамских процедура машинског учења, могуће успешно обучити роботски систем. Комбинацијом уочених 3D визуелних маркера (енгл. *3D Visual Markers*) и сензорских читавања померања у зглобовима обучен је велики број различитих роботских система представљених у [11]. Интересантно је истаћи и истраживање које се односи на употребу говорних команди и визуелних информација са циљем успешног праћења карактеристичних објеката [12].

Од резултата који обухватају роботске системе (а не човека) као демонстраторе успешног понашања, издвајају се истраживања наведена у [13-15]. Посматрањем робота-учитеља, робот идентичне структуре путем машинског учења демонстрацијом учи оптималне акције [13]. Симулација дата у [14] приказује постепено побољшање понашања интелигентног агента кроз анализу *непосећених стања* у простору стања помоћу учења демонстрацијом. Развојем комуникацијских протокола на концепцијском нивоу између различитих типова роботских система, омогућено је перманентно напредовање са аспекта успешности решавања разматраног проблема у [15].

Занимљиво је истаћи и два новија истраживања која се односе на анализу машинског учења демонстрацијом и система вештачких неуронских мрежа за мобилне роботе. *Brenna D. Argall* у својој докторској дисертацији [16] и раду [4] даје детаљну анализу формирања стратегије доношења одлука (енгл. *Policy*) на бази машинског учења демонстрацијом. Уз скуп „примитивних“ акција (енгл. *Primitive Actions*) и алгоритма корекције понашања уз помоћ човека-демонстратора, мобилни робот може аутономно да реши проблем навигације у непознатом технолошком окружењу. Поређење више различитих типова вештачких неуронских мрежа при обучавању роботских система путем машинског учења демонстрацијом дато је у [17]. Укупно је тестирано 9 акција и 4 типа вештачких неуронских мрежа кроз 6 различитих експеримената. Показано је да је мрежа динамичке структуре *NARX* дала најбоље резултате са аспекта најмање средње квадратне грешке (MSE).

### 4. СУШТИНА ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Концепцијско решење разматране нове методе управљања представљено је на слици 4. Дати алгоритам приказује ток информација у емпиријском управљачком систему реализованог у *Matlab*<sup>®</sup> софтверском пакету.

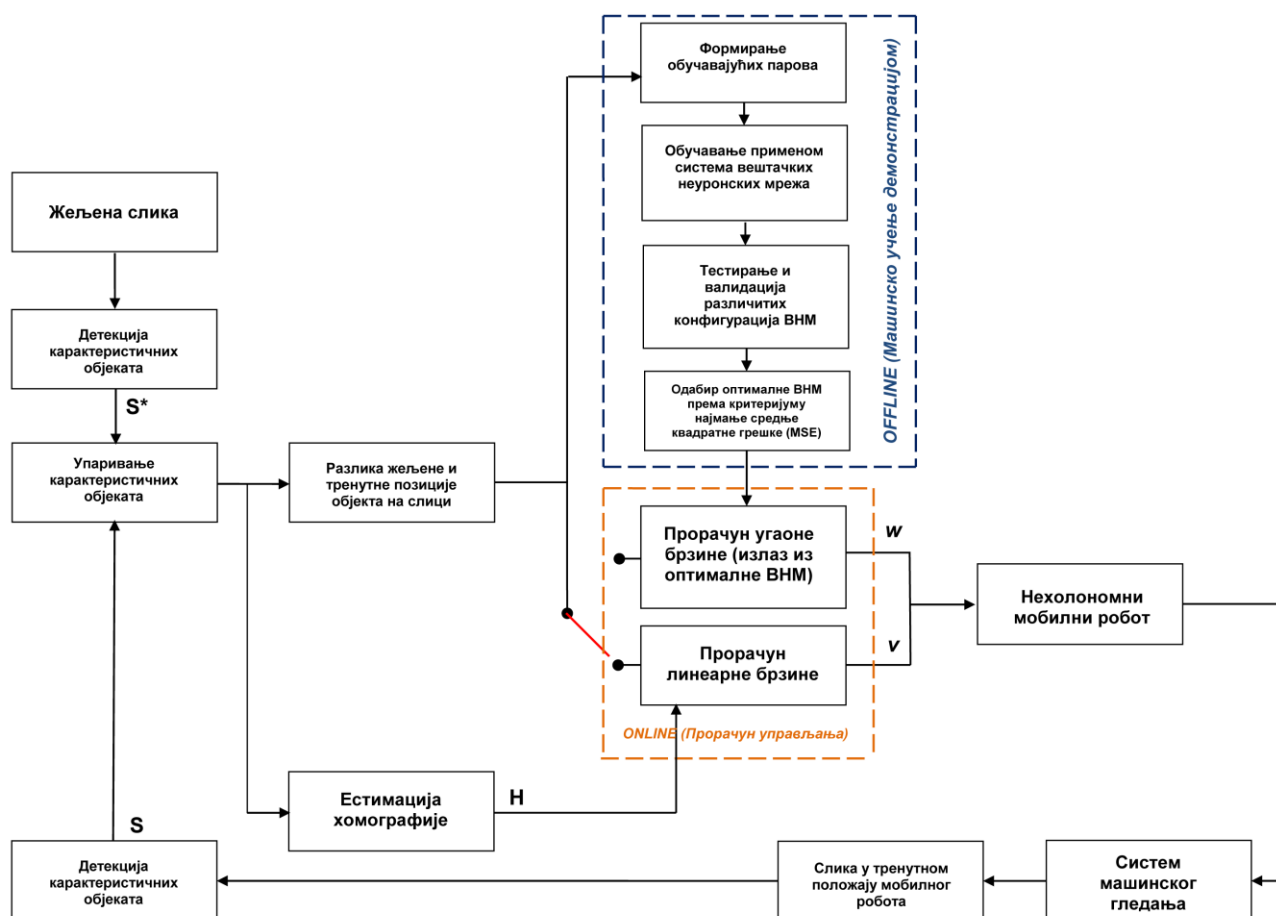
Најпре је потребно иницијализовати све величине које фигуришу у претходно описаним подсистемима управљања. Неопходно је формирати скуп обучавајућих парова, подесити почетне вредности тежинских односа ВНМ на мале случајно изабране величине, изабрати архитектуре ВНМ и параметре обучавања, подесити појачање из једначине (17), и одредити параметар активације у *online* фази управљања. Такође, потребна је и аквизиција жељене слике (односно слике која треба да се подудари са сликом у крајњем стању роботског система), како би одређивање карактеристичних објеката и елемената хомографије између две слике (тренутне и циљне)<sup>7</sup> било могуће. С обзиром да на естимацију хомографије не утичу параметри калибрационе матрице (већ искључиво положај

<sup>7</sup> Устаљени термини за тренутну и циљну (жељену) слику у литератури су *Current* и *Target (Desired) Image*, респективно.

карактеристичних објеката на слици), компатибилну камеру роботског система није потребно претходно калибрисати.

Након аквизиције слике у тренутном положају робота, карактеристични објекти се дефинишу применом тзв. *SURF* [10] алгоритма, робустног у погледу осветљености и закривљености слике. Поред детекције карактеристичних објеката, *SURF* алгоритам је коришћен и за упаривање карактеристичних објеката између две слике. Наредни корак је одређивање положаја тих упарених објеката у равни слике, односно одређивање стања карактеристичног објекта у тренутној слици. Битно је истаћи да је у свакој итерацији алгоритма неопходно утврдити разлику положаја ( $u$  координате) између карактеристичног објекта у тренутној слици и карактеристичног објекта у циљној слици. На основу тог податка, следећи корак емпиријског алгоритма управљања је израчунавање једне од управљачких величина (линеарне или угаоне брзине) мобилног робота.

Пре експерименталне верификације у реалном времену, неопходно је извршити обучавање ВНМ у *offline* режиму. Сходно томе, растојање ( $u$  координата) између одабраног карактеристичног објекта у две слике у тренутном и жељеном положају мобилног робота представља улаз у ВНМ. Излазне вредности ВНМ чине команде актуатора робота са циљем кориговања оријентације, односно смањења поменуте разлике између  $u$  координата. Оваквим решењем управљања оријентацијом постиже се робустност са аспекта поремећаја у параметрима слике и/или произвољних спољашњих поремећаја. Обучено је укупно 18 различитих ВНМ, а оптимална архитектура изабрана је по критеријуму најмање средње квадратне грешке за тзв. „тест“ скуп података. Ова корекција оријентације мобилног робота ће бити извршена у свим итерацијама алгоритма у случају да је разлика положаја посматраног карактеристичног објекта на сликама већа од 5 пиксела. У супротном, активираће се управљачки подсистем на бази хомографије у циљу прорачуна линеарне брзине у наредном тренутку (слика 4). Комплетна фаза управљања се завршава када је разлика између тренутне и циљне слике минимална, односно када је разлика у положајима карактеристичних објеката у равни обе слике испод претходно прописане границе.



Слика 4: Емпиријски управљачки систем на бази машинског учења демонстрацијом и хомографије добијене од некалибрисане камере

## 5. ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА ПРИМЕНЕ

Роботски систем за експерименталну верификацију чине мобилни робот *Khepera II*, компатибилна камера *CMUCam VISION TURRET-KheCMUCam* и *TOSHIBA* лаптоп рачунар (2.1 GHz, 4GB RAM) са *Windows Vista* оперативним системом (слика 5). Комуникација између рачунара и робота, као и између рачунара и камере се извршава путем USB адаптера (*RS232 to USB port*).



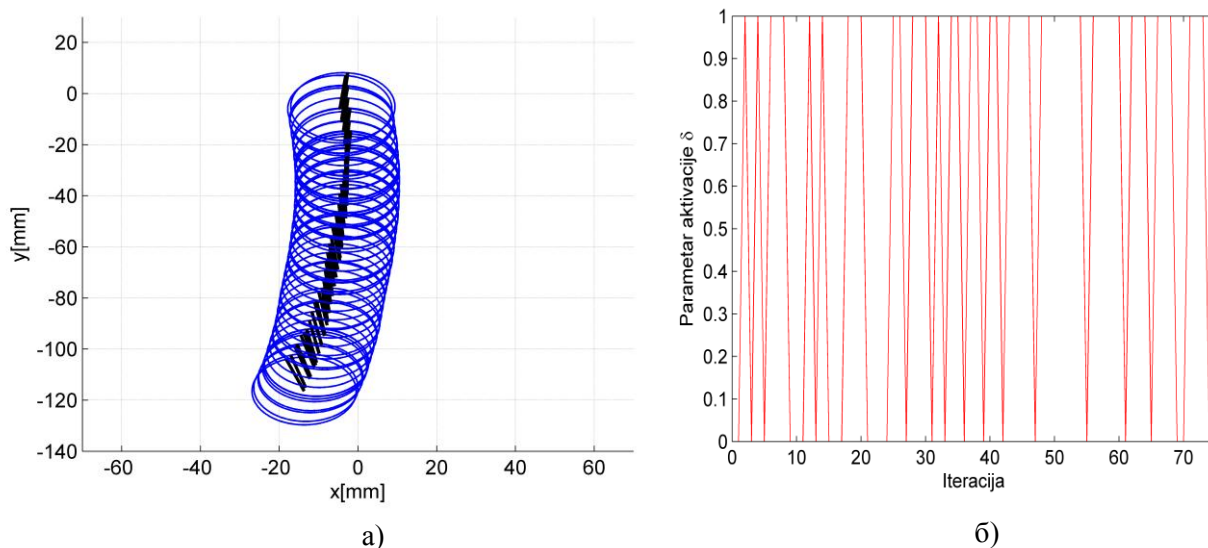
Слика 5: Мобилни робот *Khepera II* са компатибилном камером *KheCMUCam*

На почетку је неопходно обучити ВНМ како би израчуната угаона брзина мобилног робота одговарала условима управљања у реалном времену. Вектор улаза у ВНМ односи се на 64 вредности разлике између жељеног и тренутног положаја карактеристичног објекта на сликама, док одговарајући вектор излаза садржи 64 вредности актуатора (левог и десног точка) са циљем корекције оријентације у посматраној итерацији емпиријског алгоритма. Ове вредности добијене су емпиријски помоћу машинског учења демонстрацијом. Обучено је укупно 18 ВНМ са следећим усвојеним параметрима обучавања: жељена средња квадратна грешка за „тренинг“ скуп  $MSE=10^{-5}$ ; параметар учења  $lr=0.5$ ; Левенберг-Маркеов алгоритам обучавања; сигмоидна и линеарна активациона функција у скривеним и излазном слоју, респективно; максималан дозвољени број итерација обучавања  $max\_iteration=1000$ . Утврђено је да је архитектура ВНМ са два скривена слоја (10 неурона у првом и 4 неурона у другом слоју) показала најбоље перформансе сходно разматраном проблему. У Табели 1 дат је скуп свих тестираних мрежа, заједно са параметром регресије и средњом квадратном грешком за „тест“ скуп.

Табела 1. Упоредни приказ резултата обучених ВНМ

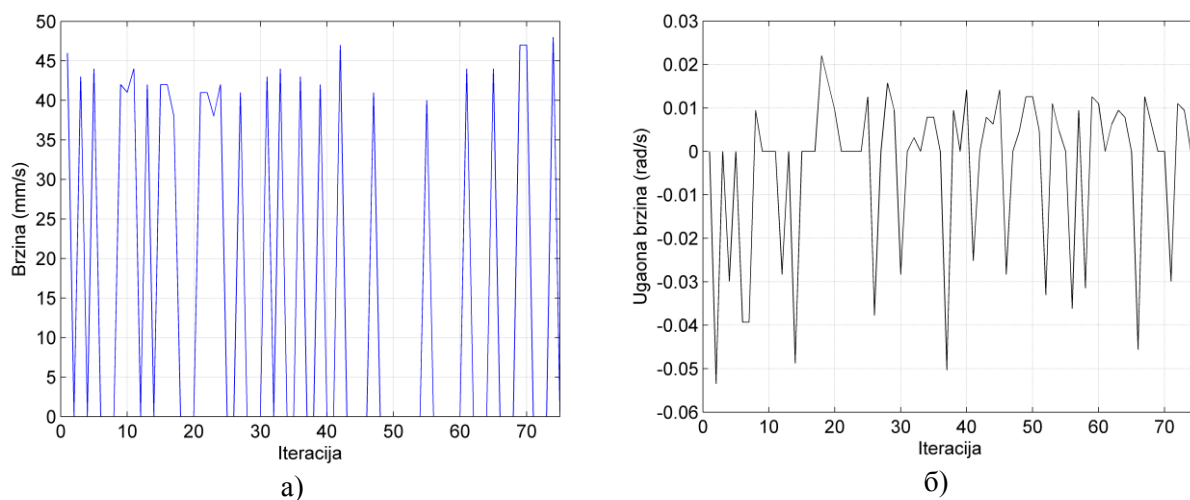
| Архитектура            | Параметар регресије R | MSE за „тест“ скуп       | Архитектура                   | Параметар регресије R | MSE за „тест“ скуп           |
|------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 1 [1] <sub>1</sub> 1   | 0.99888               | 0.00489                  | 1 [5-2] <sub>2</sub> 1        | 0.99987               | 0.00603                      |
| 1 [2] <sub>1</sub> 1   | 0.99992               | 0.00190                  | 1 [8-4] <sub>2</sub> 1        | 0.99996               | 0.00551                      |
| 1 [3] <sub>1</sub> 1   | 0.99944               | 0.00186                  | <b>1 [10-4]<sub>2</sub> 1</b> | <b>0.99999</b>        | <b>3.762*10<sup>-5</sup></b> |
| 1 [5] <sub>1</sub> 1   | 0.99995               | 0.00182                  | 1 [2-2-2] <sub>3</sub> 1      | 0.99874               | 0.00439                      |
| 1 [8] <sub>1</sub> 1   | 0.99993               | 5.91485*10 <sup>-4</sup> | 1 [3-2-2] <sub>3</sub> 1      | 0.99621               | 0.00477                      |
| 1 [10] <sub>1</sub> 1  | 0.99996               | 8.98632*10 <sup>-4</sup> | 1 [4-3-2] <sub>3</sub> 1      | 0.99993               | 0.02766                      |
| 1 [1-1] <sub>2</sub> 1 | 0.99911               | 0.005586                 | 1 [5-3-2] <sub>3</sub> 1      | 0.99989               | 0.02641                      |
| 1 [2-2] <sub>2</sub> 1 | 0.99718               | 0.003215                 | 1 [8-3-2] <sub>3</sub> 1      | 0.99917               | 3.20383*10 <sup>-4</sup>     |
| 1 [3-2] <sub>2</sub> 1 | 0.99995               | 6.02605*10 <sup>-4</sup> | 1 [8-4-2] <sub>3</sub> 1      | 0.99853               | 1.86860*10 <sup>-4</sup>     |

Након одређивања оптималне ВНМ за израчунавање угаоне брзине, неопходно је дефинисати почетни и жељени положај мобилног робота, односно камере. Жељена позиција у Декартовом координатном систему износи  $[X \ Y \ Z]^T = [0 \ 0 \ 0]^T$ , док је почетна позиција камере одређена са  $[X \ Y \ Z]^T = [-15 \ -120 \ 0]^T$ , изражено у милиметрима. С обзиром да се робот креће у равни (слика 2), угао оријентације у жељеном и почетном положају износи  $90^\circ$  и  $(90+20)^\circ$ , респективно. За референтни карактеристични објекат усвојен је онај са највећом вредношћу  $u$  координате у равни слике. Резолуција камере износи  $320 \times 240$  пиксела.



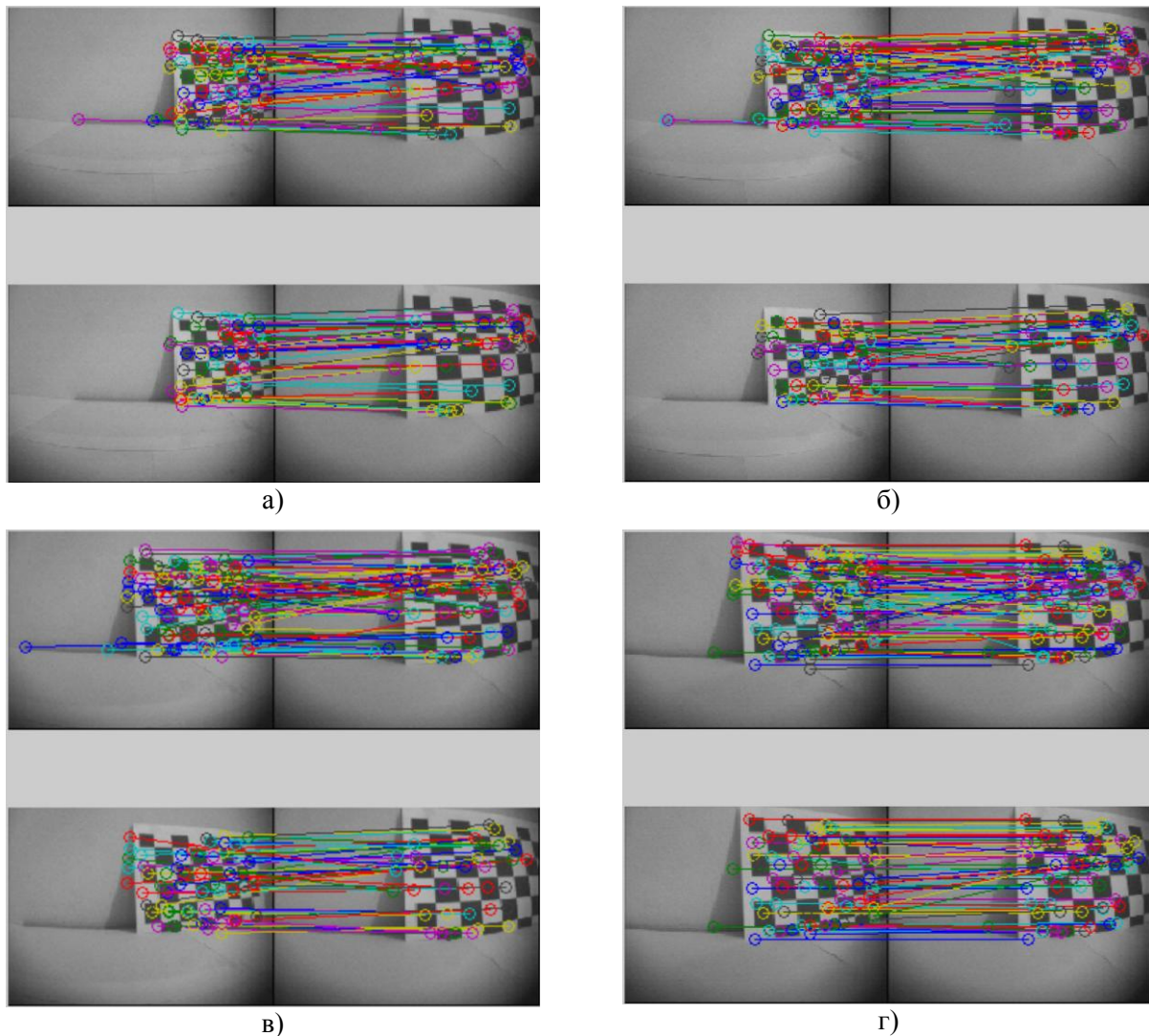
**Слика 6:** а) Положај робота у Декартовом координатном систему; б) Параметар активације „корекционог“ управљачког подсистема

На слици 6а) дата је путања робота у X-Y равни. Уочљиво је да је већ од прве итерације активан корекциони управљачки систем базиран на машинском учењу демонстрацијом и систему вештачких неуронских мрежа. Такође, са слике 6а) може се видети да се крајњи положај мобилног робота не подудара са жељеним положајем (постоји грешка у позицији и оријентацији), што је последица погрешно упарених SURF карактеристичних објеката и/или учесталије активације „корекционог“ подсистема оријентације камере у тој фази управљања. Битно је истаћи да ова мала грешка нема пресудан утицај на коначно позиционирање роботског система (видети слику 8г)). Слика 6б) приказује итерације у којима је вршена корекција оријентације робота (параметар активације има вредност један). У случајевима када је активан управљачки подсистем на бази хомографије параметар активације има вредност нула (слика 6б).



**Слика 7:** а) Промена линеарне брзине мобилног робота у току кретања; б) Промена угаоне брзине мобилног робота у току кретања

На слици 7а) представљена је промена линеарне брзине мобилног робота у току кретања (видети израз (17)). Слика 7б) приказује промену угаоне брзине робота (излаз из ВНМ). Уочљиво је да позитивне вредности линеарне брзине одговарају итерацијама са нултом вредношћу параметра активације, вредности брзина више варирају, што је последица погрешно упарених *SURF* карактеристичних тачака и/или учесталије активације „корекционог“ подсистема позиције камере у другој фази управљања. Слика 8 приказује детектоване и упарене карактеристичне објекте у току кретања робота. Са последње слике могуће је уочити незнатну разлику између тренутног и жељеног положаја мобилног робота, чиме је потврђена робустност развијеног емпиријског управљачког система са становишта управљања у реалном времену, као и поремећаја који се не могу предвидети.



**Слика 8:** а)-г) Упаривање карактеристичних објеката током кретања мобилног робота (1., 30., 50. и 75. итерација, респективно). RANSAC алгоритмом елиминисани су погрешно упарени објекти.

## 6. ЗАКЉУЧАК

Нови развијени емпиријски управљачки систем мобилног робота базира се на информацијама од камере и обухвата два подсистема. Први управљачки подсистем односи се на естимацију хомографије у циљу израчунавања линеарне брзине мобилног робота у наредној итерацији. Други подсистем на бази машинског учења демонстрацијом и системом вештачких неуронских мрежа подразумева корекцију оријентације мобилног робота у циљу смањења разлике између позиције изабраног карактеристичног објекта у тренутној и циљној (тј. жељеној) слици. Емпиријски утврђене разлике у положају карактеристичног објекта представљају улаз у ВНМ, док излаз из мреже чине команде актуаторима у наредној итерацији, како би се ова разлика спустила испод претходно дефинисане (тј. жељене) границе. Робустним алгоритмом препознавања издвојени су и упарени карактеристични објекти тренутне и циљне слике. Одабиром архитектуре вештачке неуронске

мреже са најмањом вредношћу средње квадратне грешке (MSE) за „тест“ скуп одређена је оптимална угаона брзина са аспекта управљања и упаривања карактеристичних објеката у реалном времену.

Додатна предност развијеног емпиријског управљачког система обухвата решење „проблема видног поља“ (енгл. *Field of View*), тј. проблема у области управљања на бази повратне информације од камере у коме карактеристични објекти нису у видном пољу камере. У почетном тренутку неопходан је само један карактеристични објекат ради кориговања оријентације камере, са крајњим циљем обезбеђивања што већег броја карактеристичних објеката у наредном тренутку. Поред ове предности, треба нагласити да за примену развијеног емпиријског управљачког система није потребно додатно постављање вештачких објеката/маркера (енгл. *Artificial Landmarks*) у технолошком окружењу. Такође, развијени емпиријски алгоритам се може секвенцијално применити на више различитих задатака визуелног навођења и/или навигације. Истовремено, увођењем „корекционе“ фазе управљања обезбеђена је робустност система са становишта поремећаја који се не могу предвидети.

Остварени резултати добијени експерименталном верификацијом развијеног управљачког система на мобилном роботу *Khepera II – KheIIBase* (са компатибилном камером *CMUCam VISION TURRET–KheCMUCam*) имају за крајњи циљ увођење интелигентне роботизоване манипулације радним предметима у оквиру технолошких система за производњу делова од лима. Један од праваца будућих истраживања у оквиру актуелног пројекта технолошког развоја (евиден. број *TP-35004*) обухватаће додатно унапређивање и даљи развој представљеног хибридног емпиријског управљачког система.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chaumette F., Hutchinson S., *Visual servo control part I: basic approaches*, IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 13, No. 4, pp. 82-90, 2006.
- [2] López-Nicolás G., Sagüés C., Guerrero JJ., Kragic D., Jensfelt P., *Switching visual control based on epipoles for mobile robots*, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 56, No. 7, pp. 592-603, 2008.
- [3] Szeliski R., *Computer vision: Algorithms and applications*, Springer, 2011.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Миљковић З., Александрић Д., *Вештачке неуронске мреже – Збирка решених задатака са изводима из теорије*, Универзитет у Београду – Машински факултет, 2009.
- [8] Atkeson CG., Schaal S., *Robot learning from demonstration*, In: Proceedings of the Fourteenth International Conference on Machine Learning, ICML'97, 1997.
- [9] Bentivegna DC., Ude A., Atkeson CG., Cheng G., *Humanoid robot learning and game playing using PC-based vision*, IROS'02, 2002.
- [10] Lopes M., Santos-Victor J., *Visual learning by imitation with motor representations*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, Vol. 35, No. 3, pp. 438-449, 2005.
- [11] Mataric MJ., *Sensory-motor primitives as a basis for learning by imitation: Linking perception to action and biology to robotics*, MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2002.
- [12] Steil J., Røthling F., Haschke R., Ritter H., *Situated robot learning for multi-modal instruction and imitation of grasping*, Robotics and Autonomous Systems, Vol.2&3, No.47, pp. 129-141, 2004.
- [13] Dillmann R., Kaiser M., Ude A., *Acquisition of elementary robot skills from human demonstration*, International Symposium on Intelligent Robotic Systems, SIRS'95, 1995.
- [14] Price B., Boutilier C., *Accelerating reinforcement learning through implicit imitation*, Journal of Artificial Intelligence Research Vol. 19, pp. 569-629, 2003.
- [15] Alissandrakis A., Nehaniv CL, Dautenhahn K., *Towards robot cultures?*, Interaction Studies: Social Behaviour and Communication in Biological and Artificial Systems, Vol. 5, No. 1, pp. 3-44, 2004.
- [16] Argall BD., *Learning mobile robot motion control from demonstration and corrective feedback*. Ph.D. Thesis, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, March 2009.
- [17] Suleman MU., Awais MM., *Learning from demonstration in robots: Experimental comparison of neural architectures*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 27, pp.794-801, 2011.

Одлуком Истраживачко-стручног већа Машинског факултета у Београду бр. 2401/2 од 14.12.2012. године именовани смо за рецензенте нове методе под називом „Емпиријско управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и хомографије добијене од некалибрисане камере” аутора: Марко Митић, дипл. инж. маш., проф. др Зоран Миљковић, др Најдан Вуковић, дипл. инж. маш., проф. др Бојан Бабић. На основу предлога и након анализе методе подносимо следећи:

## ИЗВЕШТАЈ

Нова метода (М85) под називом „Емпиријско управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и хомографије добијене од некалибрисане камере” представљена је на 11 страница А4 формата, коришћењем Times New Roman фонта величине 11 pt, једноструког прореда. Опис методе садржи 17 једначина, 8 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 управљања интелигентног мобилног робота применом емпиријске управљачке теорије. Развијени управљачки систем обухвата интеграцију интелигентног система базираног на емпиријски прикупљеним сензорским информацијама, машинском учењу демонстрацијом (заједно са системом вештачких неуронских мрежа) 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 оба подсистема управљања базираних на информацијама од камере. У основним цртама представљене су теоријске поставке управљачког система на основу хомографских елемената добијених од некалибрисане камере, као и теоријске поставке машинског учења демонстрацијом. Изведен је израз за израчунавање линеарне брзине мобилног робота на основу естимације хомографије, уз приказ основних геометријских релација између два произвољна положаја камере. Описана су три основна модула машинског учења демонстрацијом који су, заједно са системом вештачких неуронских мрежа, коришћени за убрзање конвергенције развијеног емпиријског алгоритма ка оптималном решењу. Модул демонстрација подразумева запис сензорских вредности неопходних за успешно извршавање постављеног задатка; модул машинског учења односи се на процес нелинеарног 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. Девет референтних научних публикација је издвојено, приказујући релевантна истраживања од 1995. године до данас. Описани су научни радови који се односе на човека и роботски систем као демонстраторе успешног понашања сходно разматраном проблему управљања. На крају одељка истакнуто је истраживање у коме је представљено поређење више различитих типова вештачких неуронских мрежа (ВНМ) при обучавању роботских система путем машинског учења демонстрацијом.

Четврто поглавље садржи суштину техничког решења приказану кроз концепцијско решење емпиријског управљачког система. Представљени алгоритам приказује ток информација у емпиријском управљачком систему реализованог у *Matlab*<sup>®</sup> софтверском пакету. Следеће

активности су извршене пре *online* фазе управљања: формирање скупа обучавајућих парова; подешавање почетних вредности тежинских односа ВНМ на мале случајно изабране величине; одабир архитектуре ВНМ и параметара обучавања; подешавање појачања линеарне брзине; аквизиција жељене слике и одређивање параметра активације управљачког подсистема. Пре експерименталне верификације у реалном времену извршено је обучавање ВНМ у *offline* режиму. Растојање (*и* координата) између одабраног карактеристичног објекта у сликама у тренутном и жељеном положају мобилног робота представља улаз у ВНМ. Излазне вредности ВНМ чине команде актуатора робота са циљем кориговања оријентације. Обучено је укупно 18 различитих ВНМ, а оптимална архитектура изабрана је по критеријуму најмање средње квадратне грешке (*MSE*) за „тест“ скуп података. Управљање мобилног робота се завршава уколико је разлика у положајима карактеристичних објеката у равни обе слике испод претходно прописане границе.

Пето поглавље приказује експерименталну верификацију развијеног управљачког система на мобилном роботу *Khepera II – KheIIBase* са компатибилном камером *CMUcam VISION TURRET-KheCMUCam*. Комуникација између *TOSHIBA* лаптоп рачунара и робота, као и између рачунара и камере се извршава путем USB адаптера. Упоредни приказ резултата обучавања 18 различитих ВНМ (заједно са параметром регресије и средњом квадратном грешком за „тест“ скуп) дат је табеларно. Приказана је и путања робота у X-Y равни, заједно са параметром активације током кретања мобилног робота. У случајевима када је активан управљачки подсистем на бази хомографије параметар активације има вредност нула (у случају прорачуна угаоне брзине овај параметар има вредност један). Такође, промена линеарне и угаоне брзине (излаз из ВНМ) мобилног робота у току експеримента је детаљно представљена. На крају овог поглавља, кроз приказ детектованих и упарених карактеристичних објеката у току кретања робота показана је робустност развијеног емпиријског управљачког система са аспекта управљања у реалном времену.

У оквиру закључка наглашена је предност развијеног емпиријског управљачког система у односу на позната постојећа решења. У почетном тренутку неопходан је само један карактеристични објекат ради кориговања оријентације робота, са крајњим циљем обезбеђивања што већег броја карактеристичних објеката у наредном тренутку. Такође, за примену развијеног емпиријског управљачког система није потребно додатно постављање вештачких објеката/маркера у технолошком окружењу. Истовремено, увођењем „корекционе“ фазе управљања обезбеђена је робустност система са становишта поремећаја који се не могу предвидети. У складу са датом анализом предлога техничког решења, као именовани рецензенти дајемо следеће

## МИШЉЕЊЕ

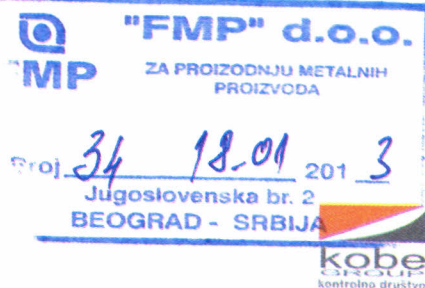
Аутори нове методе (**M85**) под називом „Емпиријско управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и хомографије добијене од некалибрисане камере“ су на јасан начин описали концепцијско решење управљања мобилног робота на бази емпиријске управљачке теорије и информација добијених од камере приликом решавања задатка 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 базираног на емпиријски прикупљеним сензорским информацијама. На основу увида у предлог нове методе и остварене резултате предлажемо Истраживачко-стручном већу Машинског факултета у Београду да се нова метода под називом „Емпиријско управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и хомографије добијене од некалибрисане камере“ прихвати као ново техничко решење.



Проф. др Жарко Ђојбашић  
Машински факултет у Нишу



Доц. др Радиша Јовановић  
Универзитет у Београду-Машински факултет



Fabrika Metalnih Proizvoda

Београд, 18. 01. 2013. године

**Предмет:** Мишљење о реализацији пројекта „Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима“ (TP-35004) у периоду 01.01.2012.-31.12.2012. (друга 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.

Као резултат првог циља истраживања настала је нова методологија која обухвата аквизицију фрикционог сигнала микроскопијом сила трења и утврђивање одступања услед топографије инжењерске површине. Ова метода обезбеђује поступак за квалитативну и квантитативну карактеризацију инжењерске површине, а посебно се истичу два поступка којима се генеришу фрактална димензија као мера храпавости и дијаграм лагунарности као показатељ распореда удубљења и испупчења на обрађеној површини. Применом овог поступка омогућава се процена потребне запремине лубриканта, чиме се смањује употреба средства за подмазивање у индустрији металних производа.

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 естимације (оцењивања) положаја мобилног робота за време извршавања транспортног задатка у оквиру система унутрашњег транспорта сировина, полуфабриката, материјала и готових делова, уз увођење повратних информација од камере. У оквиру друге методе приказан је управљачки систем мобилног робота који обухвата интеграцију интелигентног система базираног на емпиријски прикупљеним сензорским информацијама и машинском учењу демонстрацијом, и управљачког подсистема заснованог на елементима хомографске матрице добијене од камере.

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.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -  
БРОЈ: 2401/3  
ДАТУМ: 27.12.2012.

На основу захтева руководиоца пројекта проф.др Бојана Бабића бр. 2401/1 од 13.12.2012. године, одлуке о именовању рецензената и чл. 12.5 Статута Машинског факултета, Истраживачко стручно веће на седници од 27.12.2012. године, донело је следећу

### ОДЛУКУ

Прихвата се Техничко решење рађено у оквиру пројекта ТР 35004, под насловом: **„Емпиријско управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и хомографије добијене од некалибрисане камере“**, чији су аутори: Марко Митић, дипл.инж.маш., проф.др Зоран Миљковић, Најдан Вуковић, дипл.инж.маш. и проф.др Бојан Бабић, а позитивну рецензију поднели: проф.др Жарко Ћојбашић, Машински факултет у Нишу 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