

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -  
БРОЈ: 3203/19  
ДАТУМ: 22.12.2011.

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

### ОДЛУКУ

Да се за рецензенте Техничког решења рађеног у оквиру пројекта ТР-35004, под насловом: **„Нови хибридни емпиријски управљачки систем интелигентног робота вертикалне зглобне конфигурације базиран на информацијама од камере“**, чији су аутори: дипл.инж.маш. Марко Митић, проф.др Зоран Миљковић, дипл.инж.маш. Најдан Вуковић, проф.др Бојан Бабић и мр Иван Лазаревић, именују:

- проф.др Михаило Лазаревић и
- проф.др Жарко Ђојбашић, МФ у Нишу.

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

ПРОДЕКАН  
ЗА НАУЧНОИСТРАЖИВАЧКУ ДЕЛАТНОСТ  
  
Проф.др Војкан Лучанин  


## **Нови хибридни емпиријски управљачки систем интелигентног робота вертикалне зглобне конфигурације базиран на информацијама од камере**

Марко Митић<sup>1</sup>, Зоран Миљковић<sup>2</sup>, Најдан Вуковић<sup>3</sup>, Бојан Бабић<sup>4</sup>, Иван Б. Лазаревић<sup>5</sup>

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

Техничко решење припада области машинства и директно се односи на развој и експерименталну верификацију новог хибридног управљачког система интелигентног робота, и може се уврстити у напредне производне технологије. Према мишљењу Европске Комисије за развој, основ иновације у области производног машинства чини интеграција нових знања у постојеће техничке системе, односно њихова примена у правцу одрживе производње и потрошње [1]. Сходно томе, истраживања у оквиру 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*), делом се односе и на развој интелигентних система способних да уче и да се прилагођавају неодређеностима у радном окружењу. Развијени хибридни управљачки систем обухвата интеграцију интелигентног система базираног на емпиријски прикупљеним информацијама од спољашњег сензора - камере, и класичног управљачког система интелигентног робота са простором стања дефинисаним у равни слике. Резултати примене описаног техничког решења обухватају симулациону анализу развијеног управљачког система у *Matlab*<sup>®</sup> софтверском пакету и експерименталну верификацију на антропоморфном роботу вертикалне зглобне конфигурације.

### **2. ТЕХНИЧКИ ПРОБЛЕМ**

Управљачки системи базирани на информацијама од камере подразумевају коришћење техника компјутерског (машинског) гледања у сврху управљања кретањима робота. Информације могу бити прикупљене од фиксне камере која се налази изнад објеката у сцени или од камере постављене на руци робота. Сензорска информација од камере се, кроз затворени систем визуелне повратне спреге по положају енд-ефектора робота, користи за извршење задатка позиционирања и оријентације енд-ефектора релативно у односу на циљни објекат, ивицу објекта или у односу на неку сличну карактеристику објекта [2]. С обзиром да се визуелна информација о позицији и/или оријентацији карактеристичних објеката или делова користи за управљање робота, овакав вид управљања може се сматрати серво управљањем. У литератури на енглеском језику, поменути управљачки систем робота се назива „*visual servo control*” или „*visual servoing*” [3,4,5,6].

Постоје два основна типа управљања на основу информација од камере [2,3,4]:

- Управљање на основу карактеристика са слике, које су коришћене за естимацију положаја карактеристичног објекта у односу на координатни систем камере (енг. „*position-based visual servoing*”).
- Управљање на основу грешке која је у корелацији са параметрима слике (енг. „*image-based visual servoing*”).

У случају управљања на основу грешке у параметрима слике, простор стања система представља раван слике ( $\mathbb{R}^2$ ). Жељени положај камере у односу на разматрани објекат је имплицитно дефинисан вредностима параметара слике у том положају. Са становишта теорије

<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)

<sup>5</sup> Истраживач-сарадник, „ECOLAB Hygiene“, д.о.о., Београд. [atlant@ptt.rs](mailto:atlant@ptt.rs)

управљања далеко већи изазов представља управо овај тип управљања, јер карактеристике (параметри) слике представљају нелинеарне функције позиције и оријентације камере. Развијени хибридни управљачки систем делом је базиран на управљању на основу грешке у параметрима слике, тако да је у наставку дата теоријска поставка.

На самом почетку извештаја представљене су теоријске основе проблема. Након тога, развијени хибридни емпиријски управљачки систем упоређен је са сродним системима у свету. Суштина техничког решења представљена је у четвртом делу извештаја. На крају извештаја дати су симулациони модел и експериментална верификација предложеног управљачког система, као и правци даљих истраживања која ће се спроводити у оквиру актуелног пројекта технолошког развоја.

## Теоријске основе проблема

С обзиром да се хибридни 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 у технолошком окружењу.

## Теоријске поставке управљачког система на основу грешке у параметрима слике

Сви управљачки системи базирани на информацијама од камере функционишу по принципу смањења грешке, која је у општем случају дефинисана као

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{s}(\mathbf{m}(t), \mathbf{a}) - \mathbf{s}^* . \quad (1)$$

Величина  $\mathbf{m}(t)$  означава скуп параметара слике који могу чинити координате тачака од интереса у равни слике, или координате тежишта посматраног објекта. Ови параметри слике директно утичу на израчунавање вектора карактеристичних тачака (енг. *Vector of Features*),  $\mathbf{s}(\mathbf{m}(t), \mathbf{a})$ . Вектор  $\mathbf{a}$  означава скуп параметара који додатно описују разматрани систем, као што су параметри калибрационе матрице камере или карактеристике 3-D модела објекта. Променљива  $\mathbf{s}^*$  означава вектор жељених вредности карактеристичних тачака у сцени.

Основни типови управљања се разликују по одабиру параметара који чине вектор  $\mathbf{s}$ . У случају управљачког система на основу грешке у параметрима слике, скуп параметара  $\mathbf{s}$  представља скуп карактеристичних тачака директно доступних у равни слике [3]. Управљачки систем овог типа може се затим дефинисати преко релација између временски променљиве величине  $\mathbf{s}$  и просторне брзине камере  $\mathbf{v}$ .

Нека је брзина камере  $\mathbf{v}$  дефинисана преко тренутне линеарне брзине  $\mathbf{v}_k$  и тренутне угаоне брзине камере  $\mathbf{w}_k$  као  $\mathbf{v} = (\mathbf{v}_k, \mathbf{w}_k)$ , [3,4,5]. Све брзине дефинисане су у односу на координатни систем камере, односно његов координатни почетак  $\mathbf{O}_k$ . Сада се може успоставити релација између промене вектора  $\mathbf{s}$  по времену и просторне брзине  $\mathbf{v}$  као

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_s \cdot \mathbf{v} , \quad (2)$$

где  $\mathbf{L}_s$  означава такозвану *Јакобијан матрицу слике*<sup>1</sup> (енг. *Jacobian image matrix*) [3,4,5,6]. Из (1) и (2) следи релација која даје везу између промене вектора грешке по времену и брзине камере:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{L}_e \cdot \mathbf{v} , \quad (3)$$

<sup>1</sup> Други назив за  $\mathbf{L}_s$  је *матрица интеракције* (енг. *Interaction matrix*). Оба термина су подједнако заступљена у стручној литератури.

где је  $\mathbf{L}_e = \mathbf{L}_s$ . Ако усвојимо да је  $\mathbf{v}$  улазна величина управљачког система робота, и уколико би желели да осигурамо експоненцијални пад вредности грешке с временом (тј. ако уведемо израз  $\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{e}$ ), из једначине (3) можемо изразити брзину камере  $\mathbf{v}$  као

$$\mathbf{v} = -\lambda \mathbf{L}_e^+ \mathbf{e}, \quad (4)$$

где је  $\mathbf{L}_e^+ \in \mathbb{R}^{6 \times k}$  Мур-Пенрос псеудоинверзна матрица<sup>2</sup> од  $\mathbf{L}_e$  [3]. Ако матрица  $\mathbf{L}_e$  има ранг 6,  $\mathbf{L}_e^+$  се може написати као

$$\mathbf{L}_e^+ = (\mathbf{L}_e^T \mathbf{L}_e)^{-1} \mathbf{L}_e^T. \quad (5)$$

У пракси је међутим, немогуће прецизно одредити матрице  $\mathbf{L}_e$  или  $\mathbf{L}_e^+$ . Из тог разлога, неопходно је извршити естимацију једне од ових матрица. У литератури је за нотацију овакве апроксимације усвојена ознака  $\widehat{\mathbf{L}}_e^+$ . Сходно томе, коначни закон управљања је

$$\mathbf{v} = -\lambda \widehat{\mathbf{L}}_e^+ \mathbf{e}. \quad (6)$$

Као што је раније напоменуто, величина  $\mathbf{a}$  даје додатне информације о систему, а у случају управљачког система на основу грешке у параметрима слике  $\mathbf{a}$  означава параметре калибрационе матрице. Другим речима, вектор  $\mathbf{a}$  садржи информације о животној даљини  $f$ , димензији пиксела  $\beta$ , као и о положају тачке у пресеку главне оптичке осе и равни слике<sup>3</sup>  $(u_0, v_0)$ .

За произвољну тачку у простору  $\mathbf{P}$  (3-D) са координатама  $\mathbf{P} = \mathbf{P}(X, Y, Z)$  перспективном пројекцијом на раван слике добијамо тачку  $\mathbf{p}$  (2-D) са координатама  $\mathbf{p} = \mathbf{p}(x, y)$  помоћу израза

$$x = X/Z = (u - u_0)/f\beta \quad (7)$$

$$y = Y/Z = (v - v_0)/f, \quad (8)$$

где  $(u, v)$  означавају координате тачке  $\mathbf{p}$  у равни слике [7]. Јасно је да ове координате репрезентују величину  $\mathbf{m}(t)$  из једначине (1). Изводом по времену једначине (7) и (8) постају

$$\dot{x} = \dot{X}/Z - X\dot{Z}/Z^2 = (\dot{X} - x\dot{Z})/Z \quad (9)$$

$$\dot{y} = \dot{Y}/Z - Y\dot{Z}/Z^2 = (\dot{Y} - y\dot{Z})/Z. \quad (10)$$

Познато је да се брзина тачке у простору може изразити преко просторне брзине камере [7] помоћу израза

$$\dot{\mathbf{P}} = -\mathbf{v}_k - \mathbf{w}_k \times \mathbf{P}, \quad (11)$$

односно релација

$$\dot{X} = -v_x - w_y Z + w_z Y \quad (12)$$

$$\dot{Y} = -v_y - w_z X + w_x Z \quad (13)$$

$$\dot{Z} = -v_z - w_x Y + w_y X. \quad (14)$$

Заменом једначина (12)-(14) у једначине (9) и (10) добијамо

<sup>2</sup> енгл. *Moore-Penrose pseudo-inverse matrix*.

<sup>3</sup> енгл. *Principal point*.

$$\dot{x} = -v_x/Z + xv_z/Z + xyw_x - (1+x^2)w_y + yw_z \quad (15)$$

$$\dot{y} = -v_y/Z + yv_z/Z + (1+y^2)w_x - xyw_y - xw_z, \quad (16)$$

односно у векторском облику

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{L}_p \mathbf{v}, \quad (17)$$

где је Јакобијан матрица слике облика

$$\mathbf{L}_p = \begin{bmatrix} -1/Z & 0 & x/Z & xy & -(1+x^2) & y \\ 0 & -1/Z & y/Z & 1+y^2 & -xy & -x \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Израз (17) се може написати и у облику нормализованих координата тачке у равни слике, како би се описала брзина посматране тачке у односу на тачку пресека оптичке осе и равни слике [6]. Битно је напоменути и то да је, због немогућности тачног одређивања координате  $Z$  (растојање тачке у простору од равни слике), Јакобијан матрицу слике неопходно апроксимирати помоћу метода које су детаљно описане у [3,4,5]. Јасно је да одређивањем апроксимације Јакобијан матрице слике и њеном заменом у (6) одређујемо брзину камере у простору, а посредно и брзину зглобова роботског система.

### Теоријске поставке емиријског управљачког система базираног на машинском учењу ојачавањем

Данас, велики број истраживача у области производних технологија тежи развијању интелигентних система способних да уче и да ефикасно одговоре на растуће проблеме непредвидивости, променљивости, као и сложености окружења у коме се они налазе [8]. Аутономни индустријски роботи који „разумеју“ технолошки задатак и околину саставни су део интелигентних технолошких система. Ово се пре свега односи на развој нове генерације управљачких и сензорских система, посебно система препознавања базираних на сензору - камери и алгоритмама учења заснованих на емпиријском управљању [2]. Са тог становишта, машинско учење ојачавањем (енг. *Reinforcement Learning*) реализује механизме који меморишу и ажурирају одговоре окружења, омогућавајући при том перманентан тренд раста успешно изведених акција.  $Q$ -учење<sup>4</sup>, као најчешће коришћен алгоритам машинског учења ојачавањем, у комбинацији са емпиријском управљачком теоријом обезбеђује интелигентном агенту одабир најбоље могуће акције у складу са тренутним околностима.

Машинско  $Q$ -учење ојачавањем [9] омогућава интелигентном агенту - роботу да учи тзв. вредносне оцене парова стање-акција<sup>5</sup>,  $Q(s,a)$ , обезбеђујући тиме да се свако могуће стање робота заједно са акцијом која је довела интелигентног агента у то стање може математички приказати као нумеричка вредност. Свака итерација подразумева читавање са спољашњег сензора у тренутном стању, избор одговарајуће акције сходно прописаној стратегији одабира акција, одређивање вредносне оцене новог стања интелигентног агента и ажурирање функције  $Q(s,a)$  према једначини (1):

$$Q_{t+1}(s,a) \leftarrow Q_t(s,a) + \alpha \left[ r_{t+1} + \gamma \max_a Q_t(s_{t+1}, a_{\max}) - Q_t(s,a) \right], \quad (19)$$

<sup>4</sup>  $Q$ -учење (енг. *Q-Learning*) први је увео *Ваткинс* (енг. *Watkins*) у својој докторској дисертацији 1989. године.

<sup>5</sup> енг. *State-action Value Function*.

где је:  $Q_t(s, a)$  - вредносна оцена пара стање-акција у тренутку  $t$ ;  $Q_{t+1}(s, a)$  - вредносна оцена пара стање-акција у тренутку  $t+1$ ;  $\gamma$  - коефицијент учења;  $\alpha$  - параметар учења;  $r_{t+1}$  - нумеричка оцена стања након одабира акције  $a$  у стању  $s$ ;  $t+1$  - временски тренутак у наредном стању робота.

Вредносном функцијом пара стање-акција нумерички се оцењује повољност тренутног стања робота и претходно изведене акције. Већа нумеричка вредност указује на повољније стање робота, тако да у будућим итерацијама обучавања предност одабира има она акција која је интелигентном агенту обезбедила повољније стање. Након одређеног броја итерација обучавања, стратегија одабира акција фаворизује понашање робота са највећим вредностима у табели парова стање-акција.

У најчешћем броју случајева у пракси, вредносна функција пара стање-акција представља матрицу чије димензије често превазилазе могућности софтверских пакета у којима се она имплементира. Стога, логично се намеће решење у циљу смањења димензионалности табеларног записа парова стање-акција за произвољно велики простор стања, односно простор акција<sup>6</sup>. Такво решење огледа се у употреби вештачких неуронских мрежа (ВНМ) [10] у којима ће се вршити запис уређеног пара стање-акција.

Вештачке неуронске мреже као универзални апроксиматор комплексних функција, представљају парадигму вештачке интелигенције која се базира на паралелном процесирању по угледу на људски мозак [10]. 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  $Q$ -учења ојачавањем ВНМ се користе за апроксимацију вредносне функције пара стање-акција помоћу „backpropagation“ алгоритма [10], који омогућава подешавање тежинских односа ВНМ у смеру супротном од тренутног градијента грешке. Резултат једначине (19) пореди се за једначином (20) - жељеним излазом, ради израчувања грешке на сваком од неурона у излазном слоју

$$Q(s_t, a_t) = r_t + \gamma \max_{a_{t+1}} Q(s_{t+1}, a_{t+1}). \quad (20)$$

Овако израчуната грешка се простире уназад кроз мрежу ради повезивања извода квадрата грешке са сваким неуроном. Након тога, нови улаз се саопштава мрежи и цео процес се итеративно понавља. Овакав начин апроксимације вредносне функција пара стање-акција познат је као директно  $Q$ -учење [11].

### 3. ПОСТОЈЕЋЕ СТАЊЕ У СВЕТУ

У стручној литератури не постоји много примера који комбинују машинско учење ојачавањем и управљање базирано на информацијама од камере. Први рад који обједињује поменуте научне методе објављен је 2000. године и у њему је алгоритам  $Q$ -учења, базиран на резултатима сегментације слике са објектима познатог сферног облика и познатим одговарајућим радијусом, имплементиран на робот вертикалне зглобне конфигурације „PUMA 560“ [12]. Главни недостатак оваквог управљачког система представља раздвајање постављеног задатка визуелног навођења на две подкласе, што условљава генерисање две независне вредносне функције  $Q(s, a)$ . Такође, велико ограничење је то што је неопходно унапред дефинисати карактеристике сферног објекта којем се приступа. Истовремено, део података је морао да буде прикупљен пре експерименталне верификације, како би табеларни запис вредносних функција парова стање-акција садржао довољан број валидиних нумеричких вредности.

Код нас, први управљачки систем базиран на емпиријским подацима прикупљеним из технолошког окружења представљен је у [2]. Показано је да аутономни мобилни робот са управљачким системом базираним на алгоритму емпиријског управљања, након машинског учења коришћењем ВНМ, несметано прилази траженом објекту.

Од новијих резултата, издваја се истраживање наведено у [13]. Развијени управљачки систем примењен је на мобилни робот и састоји се од два управљачка подсистема базираних на

<sup>6</sup> Проблем димензионалности табеларног записа вредносне функције пара стање-акција у научној литератури на енглеском језику је познат као „Curse of dimensionality“.

информацијама од камере. Поред класичног управљачког система на основу грешке у параметрима слике, имплементиран је и подсистем на бази  $Q$ -учења за положај карактеристичних тачака (енг. „*Point features*”) у равни слике. Основна идеја је да се управља кретањем мобилног робота на основу информација од камере тако да се карактеристична тачка налази увек у специфичном делу равни слике. Сходно томе, дефинисана је жељена област у равни слике ка којој карактеристична тачка треба увек да тежи. У случају да је карактеристична тачка изван жељене области, емпиријски управљачки систем базиран на машинском учењу ојачавањем има улогу „коректора“ положаја мобилног робота, са задатком обезбеђивања најповољнијег могућег положаја посматране тачке на слици у наредном тренутку. Поред основног недостатка овог приступа који се састоји у томе што се довољан број података мора сакупити „офлајн“, употреба додатних сензора као што су ласери значајно усложњавају и поскупљују целокупан роботски систем.

Занимљиво је истаћи и два истраживања која повезују ВНМ и машинско  $Q$ -учење ојачавањем. У [14], ВНМ је коришћена за апроксимацију вредносне функције пара стање-акција мобилног робота при решавању типичних задатака праћења путање и заобилажења препрека. У оба случаја коришћен је поменути приступ директног  $Q$ -учења применом ВНМ, али са дефинисаном базом карактеристичних података. Слично овоме, у [15] је представљен алгоритам  $Q$ -учења базиран на ВНМ за подводне мобилне роботе.

#### 4. СУШТИНА ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Концепцијско решење хибридног управљачког система представљено је на слици 1. Дати алгоритам приказује ток информација унутар главног управљачког кода реализованог у *Matlab*<sup>®</sup> софтверском пакету.

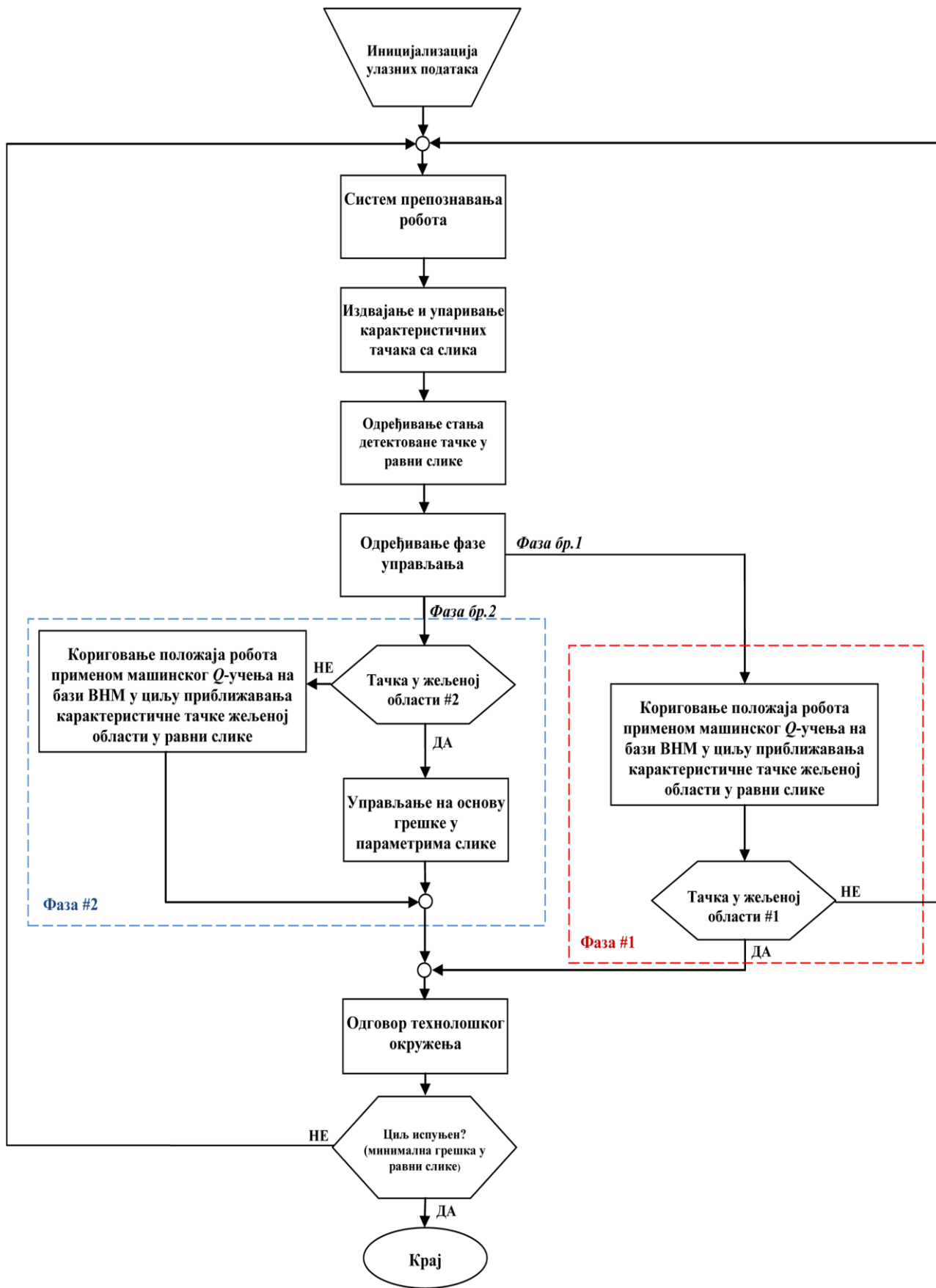
Најпре је потребно иницијализовати све величине које фигуришу у претходно описаним подсистемима управљања. Неопходно је подесити почетне вредности тежинских односа ВНМ на мале случајно изабране величине, одабрати одговарајуће вредности за параметре  $\gamma$  и  $\alpha$  из једначине (19), одредити параметар активације фазе управљања, и дефинисати жељене области у равни слике за обе фазе 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 тачака и грешке између параметара две слике (тренутне и циљне)<sup>7</sup> било могуће. Подразумева се да је камера претходно калибрисана, односно да су познате величине жижне даљине  $f$ , резолуције слике  $U \times V$ , димензије пиксела  $\beta$ , као и положаја тачке у пресеку главне оптичке осе и равни слике  $(u_0, v_0)$ .

Након аквизиције слике у тренутном положају робота, карактеристичне тачке се дефинишу применом тзв. *SURF* [16] алгоритма, робустног у погледу осветљености и закривљености слике. Поред детекције карактеристичних тачака, *SURF* алгоритам је коришћен и за упаривање<sup>8</sup> карактеристичних тачака између две слике. Затим се одређује положај тих упарених тачака у равни слике, односно стање карактеристичне тачке у тренутној слици. Битно је истаћи да се жељене области у обе фазе управљања дефинишу у односу на карактеристичну тачку у циљној слици, јер је неопходно утврдити разлику положаја  $(u, v)$  између карактеристичне тачке у тренутној слици и жељене области око карактеристичне тачке у циљној слици. Следећи корак хибридног алгоритма је одређивање тренутне фазе хибридног управљања.

Прва фаза управљања базираног на информацијама од камере се односи на кориговање грешке оријентације камере у простору, односно на одређивање величина  $w_x, w_y$  и  $w_z$ . Корекција положаја роботског система остварена је применом машинског  $Q$ -учења на бази ВНМ са дефинисаном базом карактеристичних вредности за обучавање [14]. Крајњи циљ ове фазе је такав положај робота у коме карактеристична тачка у тренутној слици припада првој жељеној области. Уколико је тај услов испуњен параметар активације узима нову вредности и аутоматски се прелази на другу фазу управљања.

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

<sup>8</sup> енг. *Feature Matching*.



Слика 1: Управљачки алгоритам хибридног емпиријског управљачког система



У другој фази управљања разликују се два подсистема управљања у зависности од положаја карактеристичне тачке. У случају да се карактеристична тачка налази у другој жељеној области врши се корекција позиције камере у простору, односно одређују се величине  $v_x, v_y$  и  $v_z$  применом класичног управљања на основу грешке у параметрима слике. Уколико се у неком тренутку карактеристична тачка нађе изван ове области, било услед поремећаја у параметрима слике или произвољних спољашњих поремећаја, корекција оријентације камере се остварује уз примену машинског  $Q$ -учења на бази ВНМ. Ова фаза (као и комплетан циклус) се завршава када је разлика између тренутне и циљне слике минимална, односно када је разлика у положајима карактеристичних тачака у равни обе слике испод претходно прописане границе.

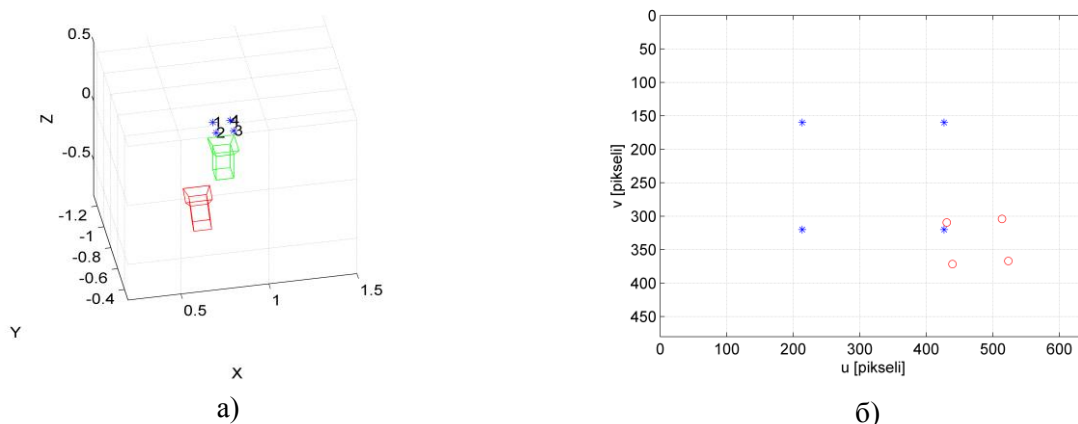
У табели 1 дат је псеудо код машинског  $Q$ -учења на бази ВНМ у општем случају. Основни *Matlab*<sup>®</sup> код за управљање на основу грешке у параметрима слике приказан је у табели 2.

<b>Табела 1: Псеудо код машинског <math>Q</math>-учења ојачавањем на бази ВНМ</b>	<b>Табела 2: Приказ основног дела кода за управљање роботског система на основу грешке у параметрима слике</b>
Иницијализација тежинских односа ВНМ (апроксимација вредносне функције пара стање-акција)	<pre> status=0; eterm=1; lambda=0.8;  while status==0      err = Ua-Ud;     err = err(:);     J = visjac_p_MMitic(Ua, Z);     v = -lambda * pinv(J) * err;     Td = trnorm(delta2tr(v));     Tcam = Tcam * Td;     Tcam=trnorm(Tcam);     Ha=rotax(-pi/2)*Tcam(1:3,1:3);     ta=Tcam(1:3,end);     Ha=[    Ha,    ta;          zeros(1,3)    , 1];      Ha=f_Rt2H_RTb(Tcam(1:3,1:3),ta);      ua,va]=f_perspproj(P,Ha,Ka);     Ua=[ua;va];     pause(0.01)      if norm(err) &lt; eterm,         status = 1;     end  end </pre>
Одређивање тренутног стања	
Одабир оптималне акције сходно дефинисаној стратегији	
Реализација селектоване акције	
Одређивање новог стања $s$ и оцене новог стања $r$	
Генерисање грешке сходно једначинама (20) и (19)	
Обучавање ВНМ према изабраном алгоритму обучавања	
Ново стање постаје тренутно стање	
Поновити целокупан циклус до тренутка појаве захтеваног понашања интелигентног агента	

## 5. ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА ПРИМЕНЕ

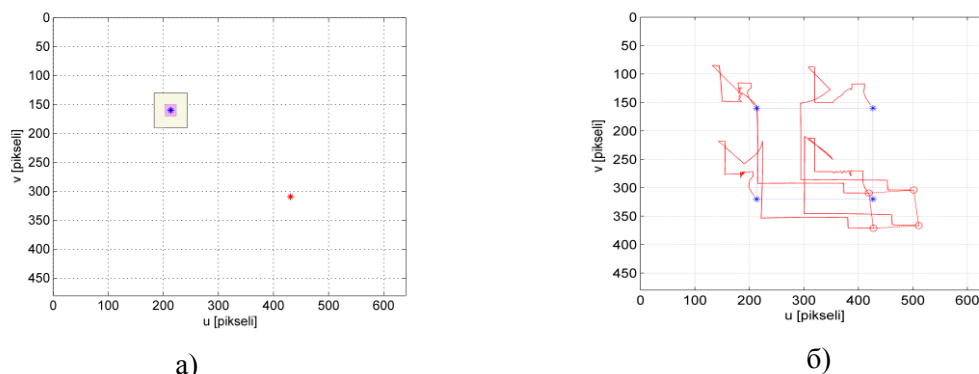
### Симулациони резултати

Симулација новог хибридног емпиријског управљачког система развијена је у *Matlab*<sup>®</sup> окружењу. Позиција карактеристичних тачака у симулацији је у сваком тренутку позната, како би било могуће израчунати њихове пројекције на раван слике. На слици 2а) означени су почетни положај камере (црвеном бојом) и жељени положај камере (зеленом бојом) у простору. Карактеристичне тачке на истој слици су означене плавом бојом. Жељена позиција у Декартовом координатном систему износи  $[X \ Y \ Z]^T = [0.8 \ -0.6 \ 0]^T$ , док је почетна позиција камере одређена са  $[X \ Y \ Z]^T = [0.688 \ -0.7 \ -0.5]^T$ , изражено у метрима. Почетна оријентација око оса  $X, Y$  и  $Z$  износи  $[5 \ -5 \ 5]$  степени респективно, док у жељеном положају оријентација око сваке од оса износи нула степени. Слика 2б) представља положај карактеристичних тачака у равни слике у жељеном положају камере (плава боја) и почетном положају камере (црвена боја). Резолуција камере у симулацији износи 640x480 пиксела.



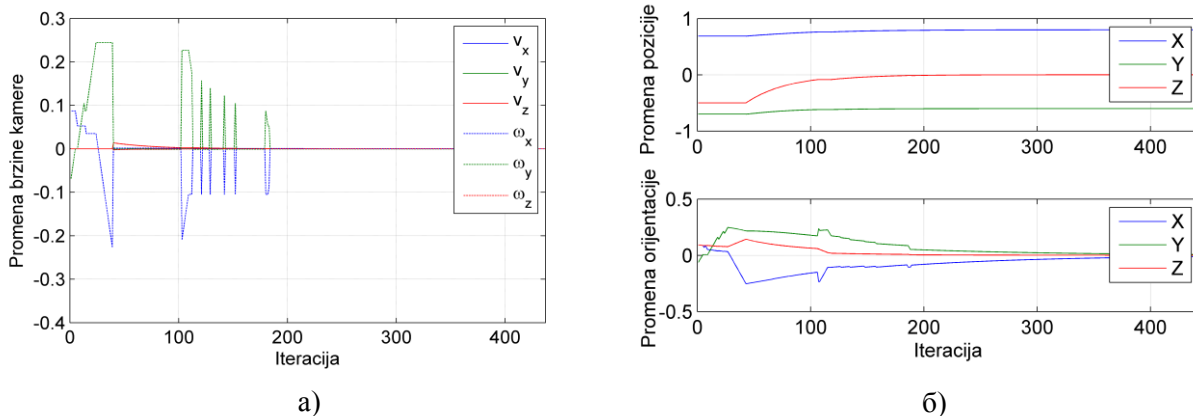
Слика 2: а) Почетни и циљни положај камере у простору; б) Распоред карактеристичних тачака у равни слике за оба положаја камере

На почетку је неопходно дефинисати жељене области карактеристичних тачака у равни циљне слике. На слици 3а) приказана је циљна слика са жељеном позицијом карактеристичне тачке за прву фазу управљања (љубичаста боја) и другу фазу управљања (сива боја). Плавом бојом је, као и у претходном случају, означена карактеристична тачка у циљном положају камере, док је црвеном бојом представљена карактеристична тачка у равни слике у почетном положају камере.



Слика 3: а) Жељене области за обе фазе управљања; б) Промена позиције карактеристичних тачака у равни слике

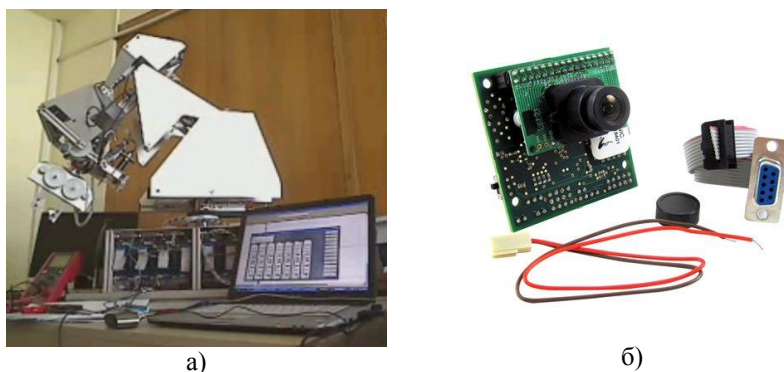
Слика 3б) означава промену позиције карактеристичних тачака у равни слике након завршетка симулације. Може се уочити да се позиција тачака у крајњем и циљном положају у потпуности подудара. Слика 4а) приказује промену просторне брзине камере у току симулације изражену у  $m/s$  за  $v_x, v_y$  и  $v_z$ , односно у  $rad/s$  за  $w_x, w_y$  и  $w_z$ . Битно је истаћи да се између итерације бр. 100 и бр. 200 примећује промена брзина камере у другој фази управљања услед активације „корекционог“ подсистема управљања базираног на машинском  $Q$ -учењу. На слици 4б) дата је промена положаја камере у Декартовом координатном систему. Очигледно је да се на крају симулације позиција и оријентација камере поклапа са жељеним положајем.



Слика 4: а) Промена просторне брзине камере; б) Промена положаја камере у Декартовим координатама

### Експериментална верификација

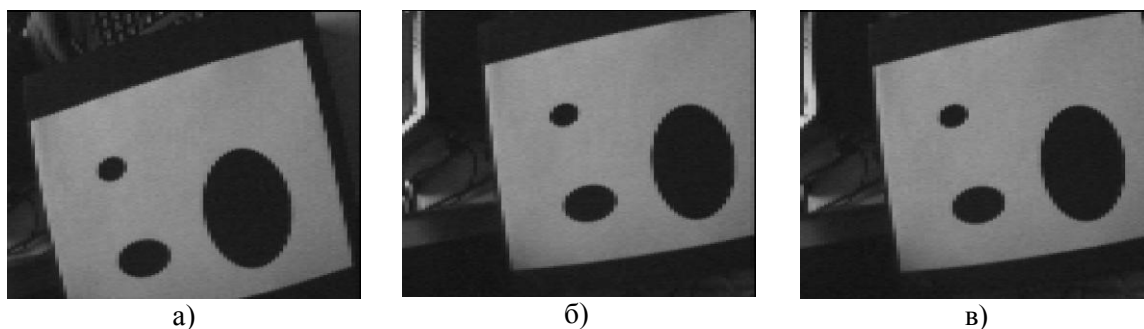
Роботски систем за експерименталну верификацију чине робот вертикалне зглобне конфигурације *NeuroArm Manipulator System* [17], компатибилна камера *CMUCam3* [18] и десктоп рачунар (2.8 GHz, 3GB RAM) са *WindowsXP* оперативним системом (слика 5).



Слика 5: а) Роботски систем; б) Детаљан приказ *CMUCam3* компатибилне камере

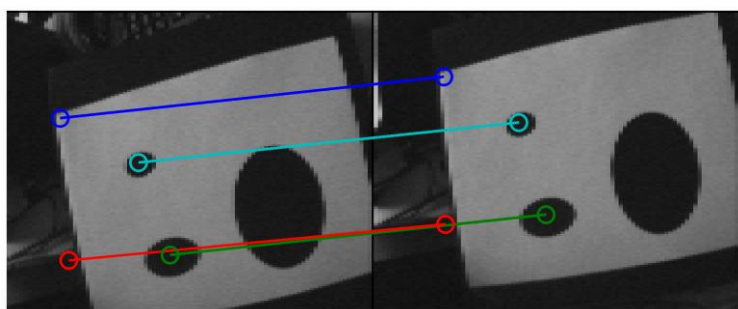
За разлику од симулационе поставке, у случају експеримента у реалном времену није могуће прецизно одредити растојање тачке у простору од равни слике (координату  $Z$ ) без употребе додатних сензора. Пошто утицај ове величине није од пресудне важности [6] за верификацију управљачког система, у експериментима је усвојена константна вредност. Као и у претходном случају неопходно је једино дефинисати циљну (жељену) слику, тако да додатне информације о 3-D сцени нису неопходне. Резолуција компатибилне камере *CMUCam3* је  $177 \times 144$  пиксела.

На слици 6 приказана је почетна, циљна и крајња слика, респективно. Може се уочити незнатна разлика између циљне слике и слике на крају експеримента. Распоред и облик карактеристичних тачака на слици одређен је искуствено.

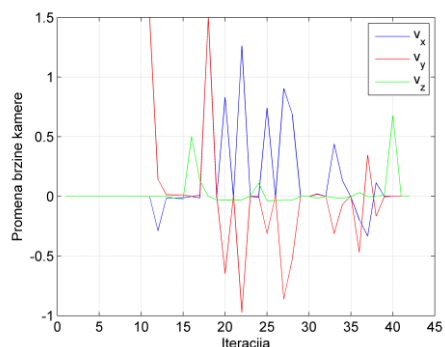


Слика 6: а) Слика у почетном положају робота; б) Циљна слика; в) Слика на крају експеримента

Слика 7а) даје положај препознатих и упарених карактеристичних тачака тренутне и циљне слике у току експеримента.



а)



б)

Слика 7: а) Упарене карактеристичне тачке након примене SURF алгоритма; б) Промена брзине камере у току експеримента

На слици 7б) приказана је промена брзина камере  $v_x$ ,  $v_y$  и  $v_z$ . Уочљиво је да вредности брзина више варирају, што је последица погрешно упарених SURF карактеристичних тачака и/или учесталије активације „корекционог“ подсистема позиције камере у другој фази управљања. Битно је истаћи да ово нема пресудан утицај на коначно позиционирање роботског система (слика б).

## 6. ЗАКЉУЧАК

Развијени хибридни емпиријски управљачки систем робота базиран је на информацијама од камере и обухвата две фазе управљања. Прва фаза подразумева кориговање оријентације камере у простору применом машинског  $Q$ -учења ојачавањем на бази вештачких неуронских мрежа, док се друга фаза односи на кориговање положаја (позиције и оријентације) камере приликом смањења разлике параметара тренутне и циљне слике. Друга фаза обухвата два подсистема управљања: класични подсистем управљања на основу грешке у параметрима слике и „корекциони“ подсистем на бази  $Q$ -учења. Робустним алгоритмом препознавања издвојене су и упарене карактеристичне тачке тренутне и циљне слике. Дефинисањем жељених области у равни циљне слике (за обе фазе управљања) обезбеђен је основни корекциони елемент управљачког система на бази  $Q$ -учења ојачавањем. На основу разлике у положају карактеристичних тачака у равни слика, грешка управљања уведена је у класични управљачки подсистем базиран на информацијама од камере.

За разлику од свих познатих постојећих решења, нови хибридни управљачки систем је робустнији у погледу управљања робота на бази камере. У почетном тренутку неопходна је само једна карактеристична тачка ради кориговања оријентације камере, са крајњим циљем обезбеђивања што већег броја карактеристичних тачака у наредном тренутку. Вештачке неуронске мреже коришћене су за апроксимацију вредносне функције пара стање-акције ( $Q$ -функције) како би обучавање роботског система било најбрже могуће. Поред тога, роботски систем има могућност учења у „online“ режиму пошто се у свакој итерацији вештачка неуронска мрежа додатно обучава, а то је значајна предност и допринос ове нове методе интелигентног управљања робота. Увођењем друге фазе управљања обезбеђена је робустност система са становишта поремећаја који се не могу предвидети.

Резултати примене предложеног емпиријског управљачког система обухватају симулациону анализу у *Matlab*<sup>®</sup> програмском пакету и експерименталну верификацију на антропоморфном роботу вертикалне зглобне конфигурације. Остварени резултати имају за крајњи циљ увођење интелигентне роботизоване манипулације радним предметима (припремак, обрадак, израдак, готов део) у оквиру технолошких система за производњу делова од лима. Један од правца будућих истраживања у оквиру актуелног пројекта технолошког развоја (евиден. број *TP-35004*) обухватаће имплементацију нових алгорита машинског учења ојачавањем у развијени хибридни управљачки систем.

## ЛИТЕРАТУРА

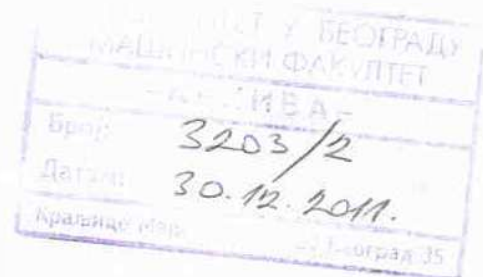
- [1] [http://ec.europa.eu/research/fp7/index\\_en.cfm?pg=nano](http://ec.europa.eu/research/fp7/index_en.cfm?pg=nano)
- [2] Миљковић З., *Системи вештачких неуронских мрежа у производним технологијама*, Серија монографских дела - ИТС, Књига 8, Универзитет у Београду – Машински факултет, 2003.
- [3] Hutchinson S., Hager G., Corke P., *A tutorial on visual servo control*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, pp. 651-670, 1996.
- [4] Chaumette F., Hutchinson S., *Visual servo control part I: basic approaches*, IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 13, No. 4, pp. 82-90, 2006.
- [5] Chaumette F., Hutchinson S., *Visual servo control part II: advanced approaches*, IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 14, No. 1, pp. 109-118, 2007.
- [6] Corke P., *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB*, Springer Tracts in Advanced Robotics, 2011.
- [7] Forsyth D., Ponce J., *Computer Vision: A Modern Approach*, Prentice Hall, 2003.
- [8] Mitsuo G., Lin L., Haipeng Z., *Evolutionary techniques for optimization problems in integrated manufacturing system: State-of-the-art-survey*, Computers & Industrial Engineering, Vol. 56, Issue 3, pp. 779-808, 2009.
- [9] Watkins C., *Learning from Delayed Rewards*, PhD Thesis, King's College, London, 1989.
- [10] Миљковић З., Александрић Д., *Вештачке неуронске мреже – Збирка решених задатака са изводима из теорије*, Универзитет у Београду – Машински факултет, 2009.
- [11] Baird L., *Residual algorithms: Reinforcement learning with function approximation*, in: Machine learning: Twelfth International Conference, San Francisco, USA, 1995.
- [12] Distanto C., Angelani A., Taurisano F., *Target Reaching by Using Visual Information and Q-learning Controllers*, Autonomous Robots, Vol. 9, pp. 41-50, 2000.
- [13] Wang Y, Lang H, de Silva CW, *A hybrid visual servo controller for robust grasping by wheeled mobile robots*, IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 15, No. 5, pp. 757-769. 2010.
- [14] Carreras M., Yuh J., Battle J., Ridao P., *Application of SONQL for real-time learning of robot behaviors*, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 55, pp. 628-642, 2007.
- [15] Lin L., Xie H., Zhang D., Shen L., *Supervised Neural Q-learning based Motion Control for Bionic Underwater Robots*, Journal of Bionic Engineering, Vol. 7 Suppl., S177-S184, 2010.
- [16] 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.
- [17] [http://www.neurorobotics.co.uk/neuroarm\\_manipulator\\_system.php](http://www.neurorobotics.co.uk/neuroarm_manipulator_system.php)
- [18] <http://cmucam.org/>

Одлуком Истраживачко-стручног већа Машинског факултета у Београду бр. 3203/1 од 23.12.2011. године именовани смо за рецензенте нове методе под називом „Нови хибридни емпиријски управљачки систем интелигентног робота вертикалне зглобне конфигурације базиран на информацијама од камере” аутора: Марко Митић, дипл.инж.маш., проф. др Зоран Миљковић, Најдан Вуковић, дипл.инж.маш., проф. др Бојан Бабић, мр Иван Б. Лазаревић, дипл.инж.маш. На основу предлога и након анализе методе подносимо следећи:

## ИЗВЕШТАЈ

Нова метода (M85) под називом „Нови хибридни емпиријски управљачки систем интелигентног робота вертикалне зглобне конфигурације базиран на информацијама од камере” представљена је на 11 страница А4 формата, коришћењем Times New Roman фонта величине 11 pt, једноструког прореда. Опис методе садржи 20 једначина, 7 слика и 2 табеларна приказа 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.



Нова метода припада области производних технологија и директно се односи на развој и експерименталну верификацију новог емпиријског управљачког система интелигентног робота. Развијени хибридни управљачки систем обухвата интеграцију интелигентног система базираног на емпиријски прикупљеним информацијама од камере и класичног управљачког система робота на бази грешке која је у корелацији са параметрима слике.

У другом поглављу образложен је технички проблем и дате су теоријске основе оба подсистема управљања базираних на информацијама од камере. Представљена је основна подела управљања на бази информација од камере, као и дефиниција појма карактеристичне тачке слике објеката. Описан је емпиријски управљачки систем базиран на машинском учењу ојачавањем, уз приказ теоријских основа имплементације вештачке неуронске мреже (ВНМ) која врши апроксимацију вредносне функције пара стање-акција. Такође, приказане су и теоријске поставке класичног управљачког система на основу грешке у параметрима слике. Детаљно је дата математичка подлога управљачких система понаособ, уз навођење референтне литературе из ове области.

У трећем поглављу наведено је постојеће стање у свету. Иако не постоји много примера интеграције дефинисаних управљачких система, актуелни резултати истраживања су детаљно описани. Пет референтних научних публикација је издвојено, приказујући релевантна истраживања од 2000. године до данас. Приликом описа сваког од њих наведена је основна идеја уз наглашавање једног или више главних недостатака.

Четврто поглавље садржи суштину техничког решења приказану кроз концепцијско решење хибридног управљачког система. Описани алгоритам емпиријског управљачког система представља ток информација унутар главног управљачког кода реализованог у *Matlab*<sup>®</sup> софтверском пакету. Иницијализација параметара управљачког система обухвата дефинисање жељених области за обе фазе управљања, подешавање тежинских односа ВНМ, као и подешавања параметра активације и параметра учења вредносне функције. Указано је на две фазе у оквиру новог хибридног управљања робота вертикалне зглобне конфигурације. Прва фаза управљања базираног на информацијама од камере односи се на кориговање грешке оријентације камере. Ова корекција роботског система остварена је применом машинског *Q*-учења на бази ВНМ са дефинисаном базом карактеристичних вредности за обучавање. У другој фази управљања два подсистема управљања у зависности од положаја карактеристичне тачке су дефинисана. У случају да се карактеристична тачка налази у другој жељеној области врши се корекција позиције камере у простору применом класичног управљања на основу грешке у параметрима слике. Уколико се у

неком тренутку карактеристична тачка нађе изван ове области, корекција оријентације камере се остварује уз примену машинског  $Q$ -учења на бази ВНМ.

Пето поглавље приказује добијене симулационе резултате и експерименталну верификацију на роботу вертикалне зглобне конфигурације. Симулација новог хибридног емпиријског управљачког система развијена је у *Matlab*<sup>®</sup> окружењу. Дефинисани су жељена и тренутна позиција и оријентација камере на почетку симулације. Такође, иницијализација је обухватала одређивање жељених области за обе фазе управљања у циљној равни слике објеката. Добијени резултати указују на то да се по завршетку симулације позиција и оријентација камере у потпуности поклапа са жељеним положајем.

Експериментални систем за верификацију предложеног концепта емпиријског управљања чине: робот вертикалне зглобне конфигурације *NeuroArm Manipulator System*, компатибилна камера *CMUCam3* и десктоп рачунар са *WindowsXP* оперативним системом. Дат је упоредни приказ почетне, циљне и крајње слике објеката. Уочљива је незнатна разлика између циљне слике и слике на крају експеримента, што несумњиво потврђује валидност описаног управљачког система. Приказан је и положај препознатих и упарених карактеристичних тачака тренутне и циљне слике, као и промена брзине камере у току извођења експеримента. Сагледавањем свих датих приказа може да се уочи да варијација вредности брзина током експеримента нема пресудан утицај на коначно позиционирање роботског система.

У оквиру закључка наглашена је предност развијеног хибридног управљачког система у односу на позната постојећа решења. Постојање само једне карактеристичне тачке ради кориговања оријентације камере у почетном тренутку представља значајну предност у реалним, непредвидивим условима експлоатације роботског система. Поред тога, важно је да се нагласи и то да применом приказаног хибридног емпиријског управљања роботски систем има могућност учења у „*online*” режиму, с обзиром да се у свакој итерацији ВНМ додатно обучава. Такође, увођењем друге фазе управљања обезбеђена је робустност система са становишта поремећаја који се не могу предвидети. На крају закључка дат је кратак осврт на правац будућих истраживања.

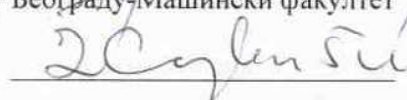
У складу са анализом предлога техничког решења, као именовани рецензенти дајемо следеће

## МИШЉЕЊЕ

Аутори нове методе (M85) под називом „**Нови хибридни емпиријски управљачки систем интелигентног робота вертикалне зглобне конфигурације базиран на информацијама од камере**” су на јасан начин описали основне теоријске концепте новог хибридног управљачког система. Хибридни емпиријски управљачки систем обухвата две фазе управљања које га чине робустним са становишта непредвидивих утицаја генерисаних из спољашњег 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 информацијама добијеним од камере. Посебно је важно нагласити да остварени резултати имају за крајњи циљ увођење интелигентне роботизоване манипулације радним предметима (припремак, обрадак, израдак, готов део) у оквиру технолошких система за производњу делова од лима, што је значајно са аспекта примене ове нове методе. На основу увида у предлог нове методе и остварене резултате предлажемо Истраживачко-стручном већу Машинског факултета у Београду да се нова метода под називом „**Нови хибридни емпиријски управљачки систем интелигентног робота вертикалне зглобне конфигурације базиран на информацијама од камере**” прихвати као ново техничко решење.



Проф. др Михаило Лазаревић  
Универзитет у Београду-Машински факултет



Проф. др Жарко Ђојбашић  
Универзитет у Нишу-Машински факултет



Београд, 16. 01. 2012. године

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

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

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

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

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



Генерални директор ФМП д.о.о.

Небојша Стојановић, дипл. маш. инж.

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

www.fmp.co.rs

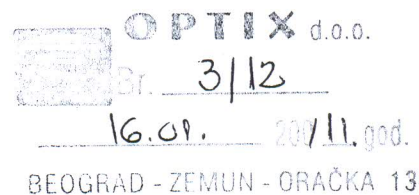
office@fmp.co.rs





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

Београд, 16. 01. 2012. године



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

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

Генерални директор OPTIX д.о.о.

Драгомир Стаменковић, дипл. маш. инж.



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
-МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ-

Број: 3203/2

Датум: 28.12.2011. год.

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

### ОДЛУКУ

Прихвата се Техничко решење рађено у оквиру пројекта ТР-35004, под насловом „Нови хибридни емпиријски управљачки систем интелигентног робота вертикалне зглобне конфигурације базиран на информацијама од камере“, чији су аутори: дипл.инж.маш. Марко Митић, проф.др Зоран Миљковић, дипл.инж.маш. Најдан Вуковић, проф.др Бојан Бабић и мр Иван Лазаревић.

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



ПРОДЕКАН ЗА

ИСТРАЖИВАЧКУ ДЕЛАТНОСТ

Проф. др Војкан Лучанин