



# ЕМПИРИЈСКО УПРАВЉАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ МОБИЛНОГ РОБОТА БАЗИРАНО НА МАШИНСКОМ УЧЕЊУ

Кандидат: **Марко Митић**, дипл. маш. инж.

Комисија за оцену и одбрану:

др Зоран Миљковић, ред. проф., МФБГ, ментор  
др Бојан Бабић, ред. проф., МФБГ  
др Живана Јаковљевић, доцент, МФБГ  
др Радиша Јовановић, доцент, МФБГ  
др Жарко Ћојбашић, ред. проф., МФ Ниш

# Садржај (1/2)

1. Увод – аутономност робота, емпиријско управљање, полазне хипотезе истраживања, остварени научни допринос;
2. Индустрijски мобилни роботи – унутрашњи транспорт материјала, интелигентни технолошки систем, дефинисање стања и модела промене стања мобилног робота;
3. Емпиријско управљање – теоријске основе, машинско учење ојачавањем, машинско учење демонстрацијом, вештачке неуронске мреже, симулациони и експериментални резултати оригиналног емпиријског управљачког система;
4. Управљање роботских система на основу информација добијених од камере – модел камере, алгоритми препознавања карактеристичних објеката, управљање на бази: грешке у параметрима слике, издвојених карактеристика са слике неопходних за оцењивање положаја карактеристичног објекта, еиполарне геометрије и хомографије.  
Експериментални резултати развијеног алгоритма емпиријског управљања;

# Садржај (2/2)

5. Нови хибридни емпиријски управљачки систем робота вертикалне зглобне конфигурације базиран на информацијама добијеним од камере – *симулациони и експериментални резултати*;
6. Управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и информација добијених од камере – *експериментални резултати*;
7. Репродукција жељене трајекторије и визуелно навођење интелигентног мобилног робота на бази биолошки инспирисаног алгоритма и хомографије – *теорија ројева и алгоритми оптимизације, одређивање глобалног оптимума нелинеарне функције применом алгоритма оптимизације колонијом свитаца, оригинални систем емпиријског управљања интелигентног мобилног робота*;
8. Закључак и правци будућих истраживања

- Систем који укључује способност да „осећа“ своје окружење, процесира информације у функцији редуковања неодређености, планира, генерише и извршава управљачке акције у ситуацијама које су стохастичке, конституише интелигентни управљачки систем;
- Аутономност робота базирана је на реализацији управљачких команди на начин да се у дужем временском периоду (*long-term memory*) обављају изабрани технолошки задаци без спољашње интервенције;
- Истраживања у оквиру ове докторске дисертације подразумевају развој управљачких система на бази сопственог искуства робота стеченог кроз интеракцију са окружењем, применом техника машинског учења, уз информације добијене од спољашњих сензора.

# Увод – полазне хипотезе

- Могуће је развити управљачки систем интелигентног роботског система који има способности машинског учења и прилагођавања реалним условима за карактеристичне проблеме навигације и избегавања препрека у реалном технолошком окружењу;
- Имплементацијом техника вештачке интелигенције (computational intelligence) могуће је да се обезбеди ефикасно машинско учење мобилног робота током фазе истраживања технолошког окружења, а у циљу реализације аутономног понашања у домену комплексног задатка локализације робота;
- Развојем хибридног емпиријског управљачког система интелигентног мобилног робота на бази информација добијеним од камере, могуће је обезбедити интелигентну роботизовану манипулацију радним предметима (припремак, обрадак, израдак, готов део) у оквиру технолошких система за производњу делова од лима.

# Увод – остварени научни допринос

Остварени научни допринос дисертације огледа се кроз развој и експерименталну верификацију пет оригиналних алгоритама управљања:

- Метода емпиријског управљања мобилног робота (потпоглавље 3.6);
- Хибридни алгоритам управљања мобилног робота који се састоји од две независне управљачке петље (потпоглавље 4.5);
- Хибридни управљачки систем робота вертикалне зглобне конфигурације који се заснива на машинском учењу ојачавањем и управљању на бази грешке у параметрима слике (поглавље 5);
- Емпиријски управљачки систем мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и еиполарне геометрије (поглавље 6);
- Хибридни управљачки систем мобилног робота на бази алгоритма оптимизације колонијом свитаца и хомографије (поглавље 7).

# Садржај

1. Увод – аутономност робота, емпиријско управљање, полазне хипотезе истраживања, остварени научни допринос;
2. Индустрijски мобилни роботи – унутрашњи транспорт материјала, интелигентни технолошки систем, дефинисање стања и модела промене стања мобилног робота;
3. Емпиријско управљање – теоријске основе, машинско учење ојачавањем, машинско учење ојачавањем, вештачке неуронске мреже, симулациони и експериментални резултати оригиналног емпиријског управљачког система;
4. Управљање роботских система на основу информација добијених од камере – модел камере, алгоритми препознавања карактеристичних објеката, управљање на бази: грешке у параметрима слике, издвојених карактеристика са слике неопходних за оцењивање положаја карактеристичног објекта, еиполарне геометрије и хомографије.  
Експериментални резултати развијеног алгоритма емпиријског управљања;

# Индустријски мобилни роботи

Интелигентни технолошки системи:

- Синергија вештачке интелигенције (ВИ) и рачунарски интегрисаних технологија (РИТ);

**ИТС (ВИ  $\wedge$  РИТ(CAD  $\wedge$  CAM  $\wedge$  CAQ  $\wedge$  CAPP  $\wedge$  ФТС(MA  $\wedge$  ИР  $\wedge$  P))**

- Фактори који се морају задовољити при концепцијском пројектовању ИТС:

пројектовање, планирање, производња,  
дистрибуција материјала

- Роботизовни унутрашњи транспорт материјала



# Индустријски мобилни роботи

Унутрашњи транспорт: брзо, тачно, економично и ефикасно кретање материјала на начин који обезбеђује максималну безбедност материјала (делова) и људи у окружењу

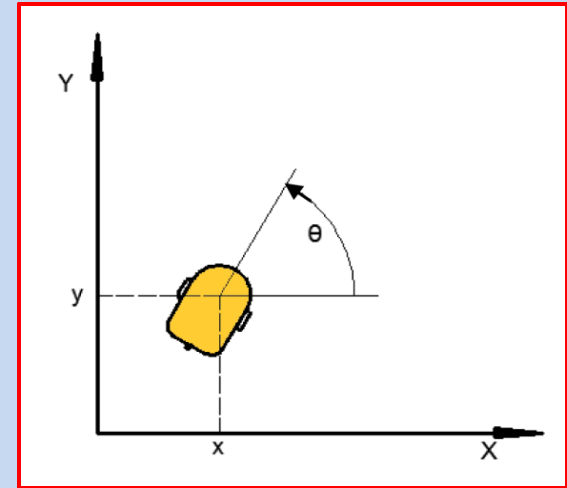


# Индустријски мобилни роботи

Модел кретања (модел промене стања)

$$\mathbf{x}_k = [x \ y \ \theta]^T$$

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1} + \Delta \mathbf{x} &= \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} \Delta s \cos(\theta + \Delta \theta / 2) \\ \Delta s \sin(\theta + \Delta \theta / 2) \\ \Delta \theta \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta s_d + \Delta s_l}{2} \cos\left(\theta + \frac{\Delta s_d - \Delta s_l}{2b}\right) \\ \frac{\Delta s_d + \Delta s_l}{2} \sin\left(\theta + \frac{\Delta s_d - \Delta s_l}{2b}\right) \\ \frac{\Delta s_d - \Delta s_l}{b} \end{bmatrix} \end{aligned}$$



$$(\Delta s_d, \Delta s_l)$$

- пређени пут  
десног и левог  
погонског точка  
респективно,

$$(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta)$$

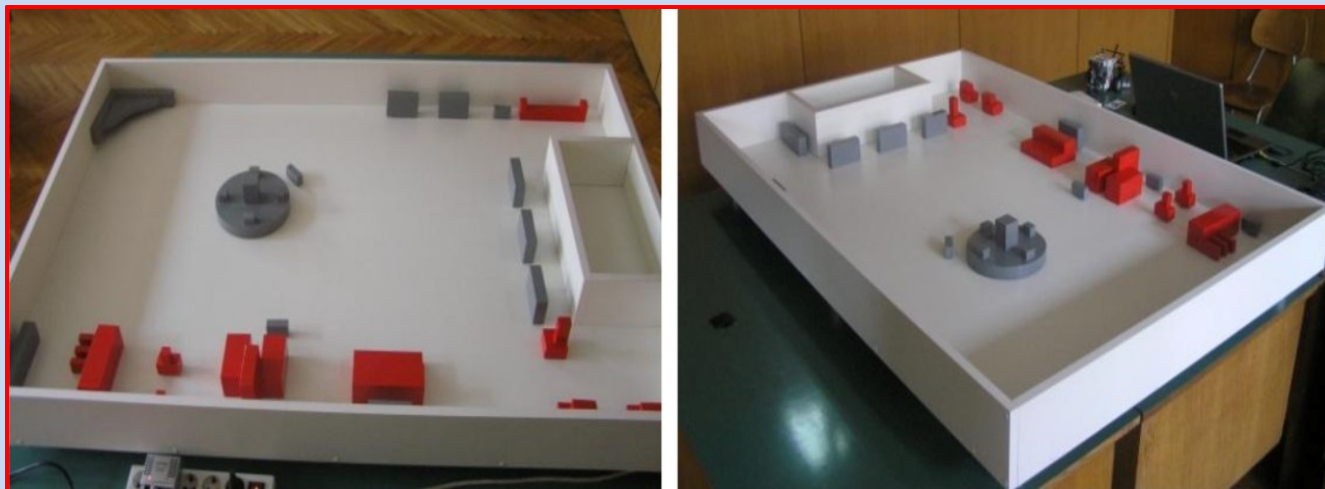
- померај

$$b$$

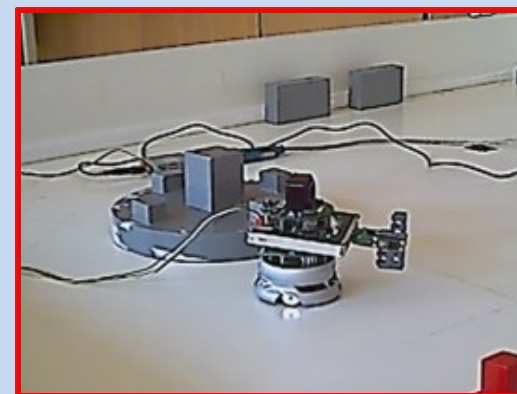
- размак између  
точкова

# Индустријски мобилни роботи

Лабораторијски модел технолошког окружења



Нехолономни мобилни робот *Khepera II*, компатибилна камера *KheCMUCam* и хватач *KheGrip*



# Садржај

1. Увод – аутономност робота, емпиријско управљање, полазне хипотезе истраживања, остварени научни допринос;
2. Индустрijски мобилни работи – унутрашњи транспорт материјала, интелигентни технолошки систем, дефинисање стања и модела промене стања мобилног робота;
3. Емпиријско управљање – теоријске основе, машинско учење ојачавањем, машинско учење демонстрацијом, вештачке неуронске мреже, симулациони и експериментални резултати оригиналног емпиријског управљачког система;
4. Управљање роботских система на основу информација добијених од камере – модел камере, алгоритми препознавања карактеристичних објеката, управљање на бази: грешке у параметрима слике, издвојених карактеристика са слике неопходних за оцењивање положаја карактеристичног објекта, еиполарне геометрије и хомографије.  
Експериментални резултати развијеног алгоритма емпиријског управљања;

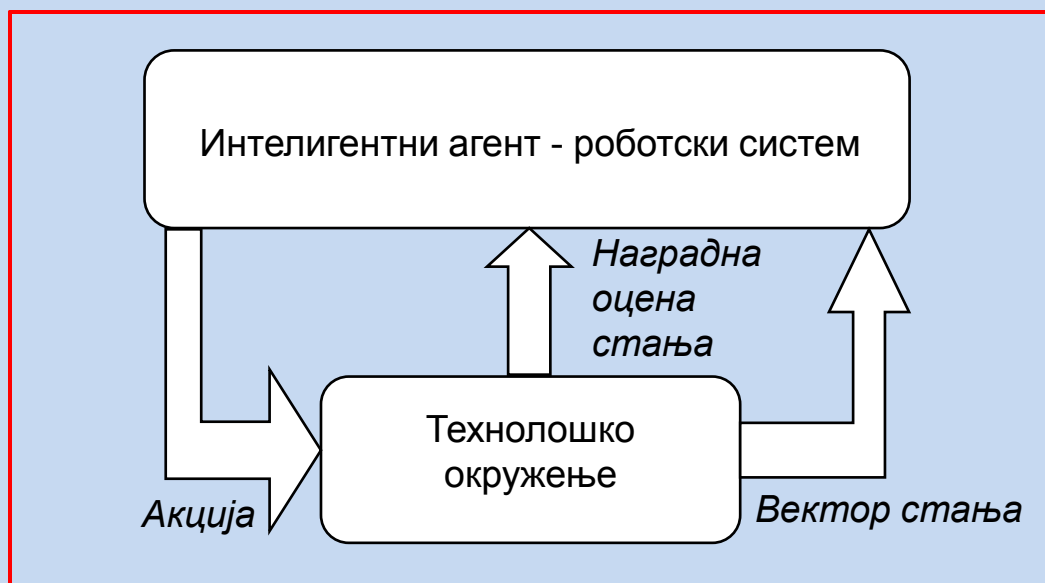
# Емпиријско управљање

- Будући рад интелигентног агента је заснован на оцени успешности извршавања прописаног задатка у прошлости

Елементи емпиријског процеса	
1.	Предвиђање излаза на основу нивоа поузданости за сваки улазно-излазни уређени пар
2.	Покушај остваривања изабраног излаза
3.	Поређење оствареног излаза са предвиђеним излазом
4.	У случају подударања оствареног и предвиђеног излаза, меморисаће се скуп управљачких акција и модел предвиђања
5.	Уколико не може да се оствари конзистентност у спровођењу управљачких акција при извршавању задатка, треба одбацити тренутни модел предвиђања, а затим усвојити нови који је боље успостављен

# Емпиријско управљање

- Емпиријски (управљачки) систем мора самостално да учи током процеса истраживања окружења



# Емпиријско управљање

## Машинско учење ојачавањем (*Reinforcement Learning*)

- Засновано је на Марковљевом процесу одлучивања (*Markov Decision Processes*)

$$S_{t+1} = f(S_t, a_t, \dots, z_t)$$

- Стратегија доношења акција  $\pi$
- Очекивана вредносна оцена стања

$$V^\pi(\mathbf{x}_0) = \lim_{M \rightarrow \infty} \mathbb{E} \left[ \sum_{t=0}^M \gamma^t r(\mathbf{x}_t, \pi(\mathbf{x}_t)) \right]$$

# Емпиријско управљање

## Машинско Q-учење ојачавањем (*Q-Learning*)

Псеудокод машинског Q-учења ојачавањем	
1.	Иницијализација вредносне функције пара стање-акција
2.	Одређивање тренутног стања и одабир одговарајуће акције
3.	Додељивање наградне оцене стања и одређивање наредног стања
4.	Ажурирати вредносне функције пара стање-акција према: $Q_{t+1}(\mathbf{x}_t, a_t) = Q_t(\mathbf{x}_t, a_t) + \alpha_t \left[ r(\mathbf{x}_t, a_t) + \gamma \hat{V}_t(\mathbf{x}_{t+1}) - Q_t(\mathbf{x}_t, a_t) \right]$ где је $\hat{V}_t(\mathbf{x}_{t+1}) = \max_a [Q(\mathbf{x}_{t+1}, a)]$
5.	Поновити процедуру све док не буду задовољени постављени критеријуми заустављања



# Емпиријско управљање

## SARSA алгоритам машинског учења ојачавањем

Псеудокод SARSA алгоритма машинског учења ојачавањем	
1.	Иницијализација вредносне функције пара стање-акција
2.	Одређивање тренутног стања и одабир одговарајуће акције према усвојеној стратегији одлука
3.	Додељивање наградне оцене стања и одређивање наредног стања
4.	Одређивање наредне акције према усвојеној стратегији одлука
5.	Ажурирати вредносне функције пара стање-акција према: $Q_{t+1}(\mathbf{x}_t, a_t) = Q_t(\mathbf{x}_t, a_t) + \alpha_t [r(\mathbf{x}_t, a_t) + \gamma Q_{t+1}(\mathbf{x}_{t+1}, a_{t+1}) - Q_t(\mathbf{x}_t, a_t)]$
6.	Поновити процедуру све док не буду задовољени постављени критеријуми заустављања

\*SARSA – *State, Action, Reward, State, Action*

# Емпиријско управљање

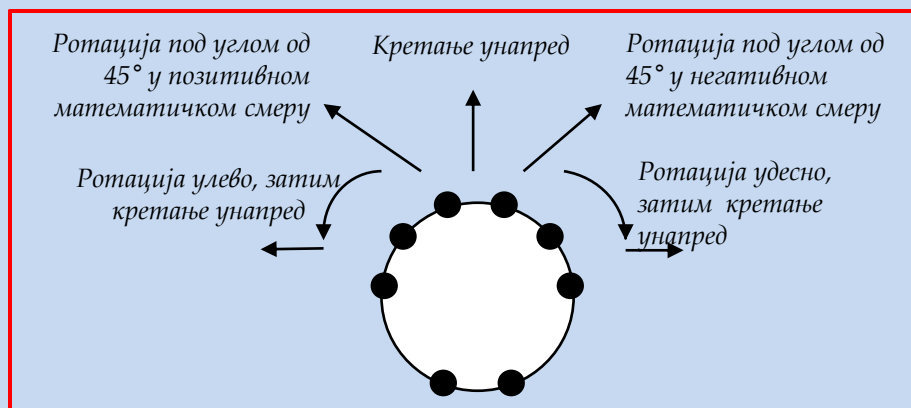
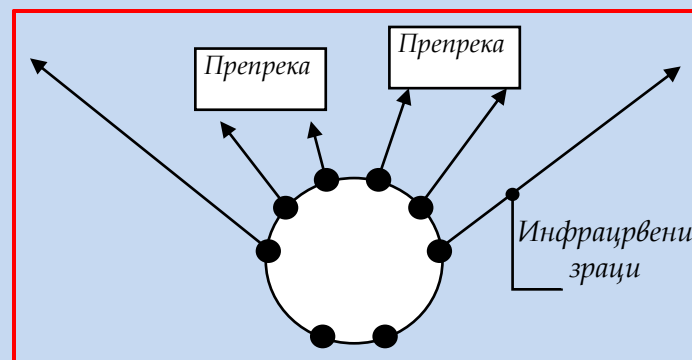
## Машинско учење демонстрацијом (*Learning from Demonstration - LfD*)

- Машинско учење имитацијом и машинско учење демонстрацијом

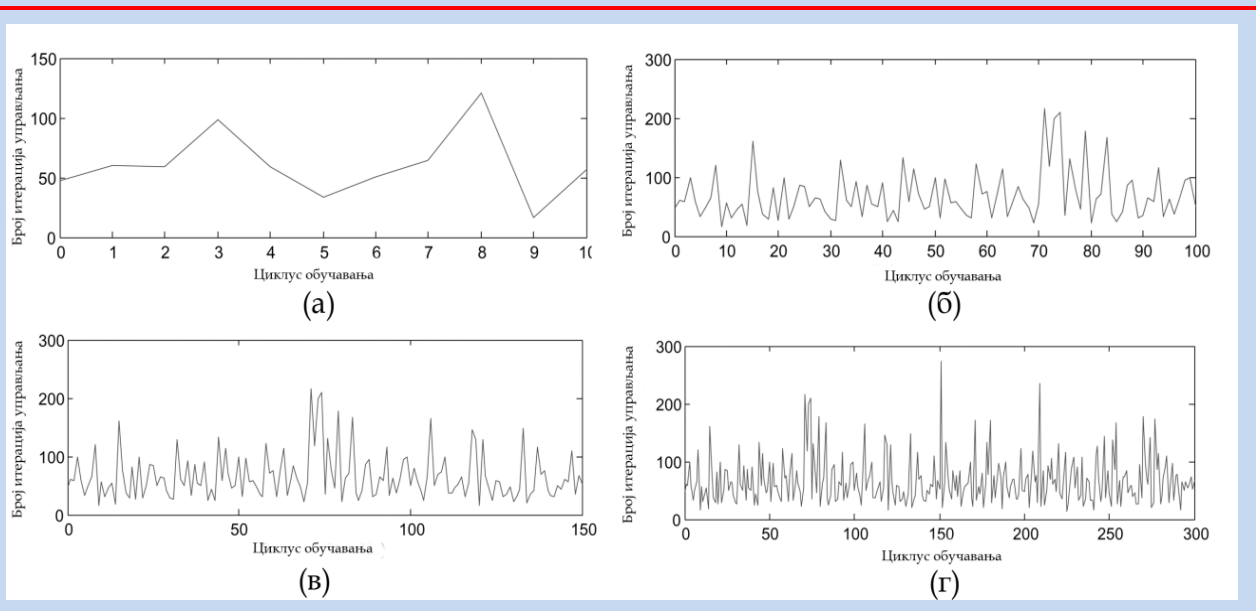
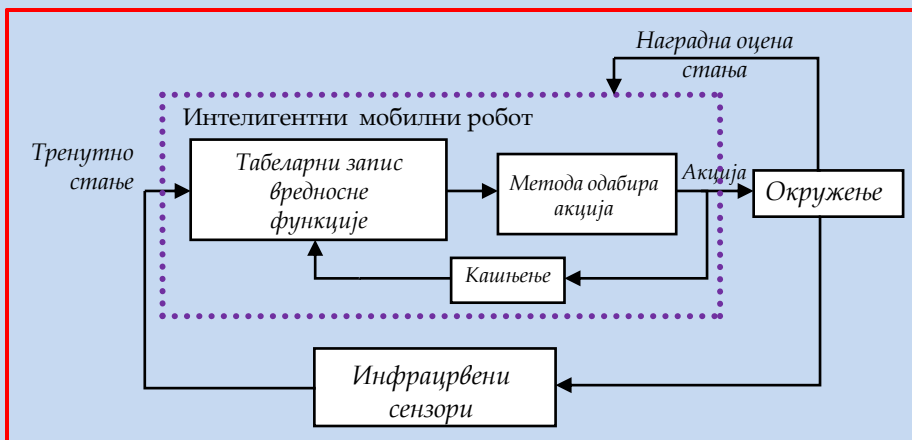


# Емпиријско управљање – симулациони резултати

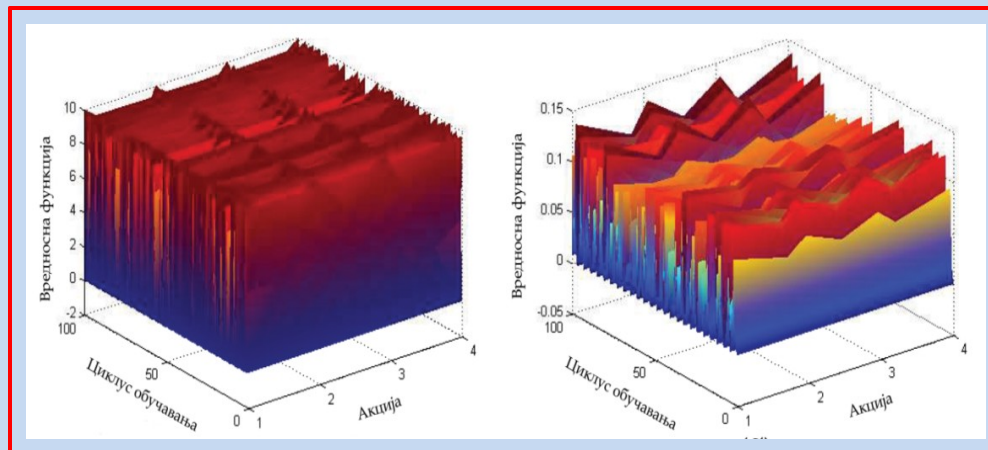
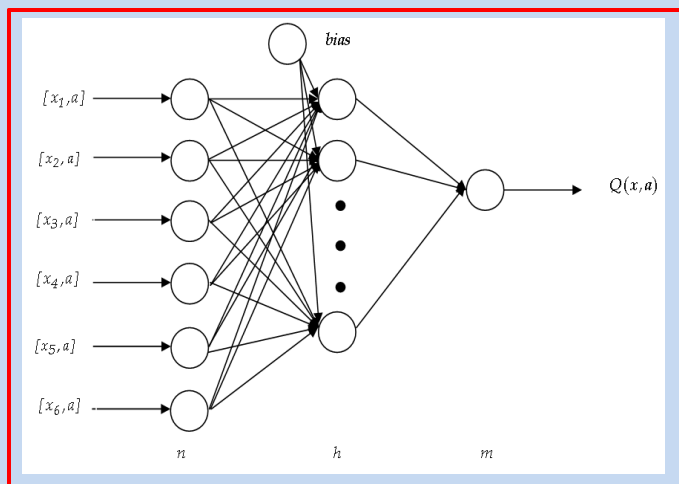
- Симулација развијена у *MATLAB*<sup>®</sup> софтверском пакету
- *Kheperall* мобилни робот
- 5 стања, 5 акција
- Могуће вредности стања: 0; 0.5; 1;



# Емпиријско управљање – симулациони резултати

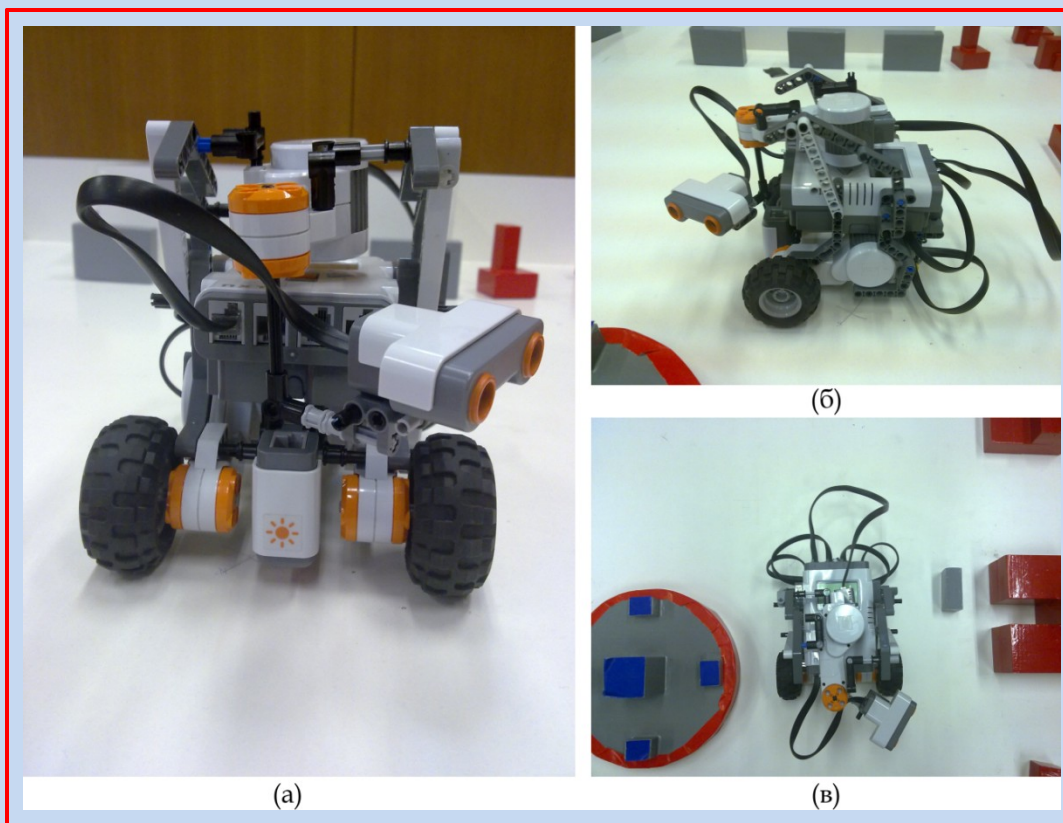


# Емпиријско управљање – симулациони резултати



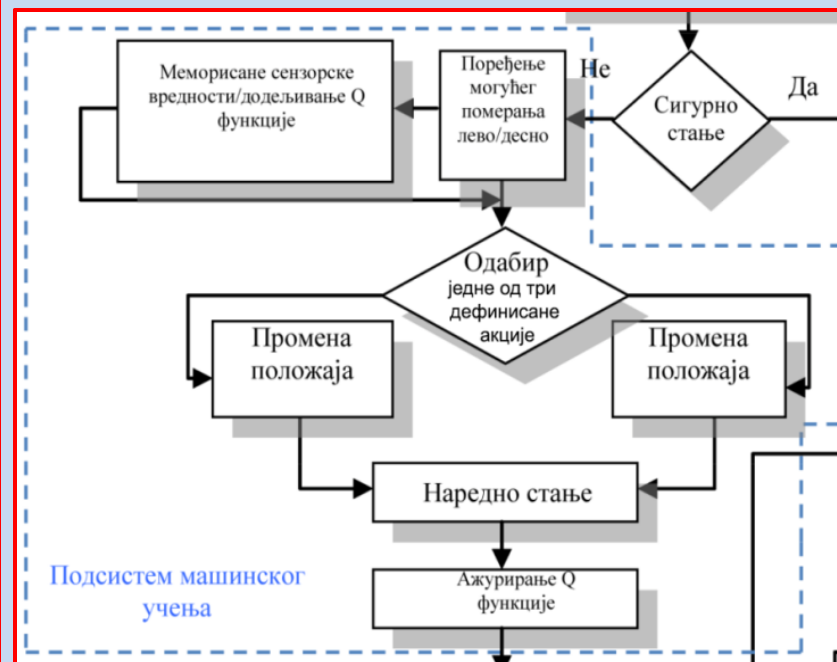
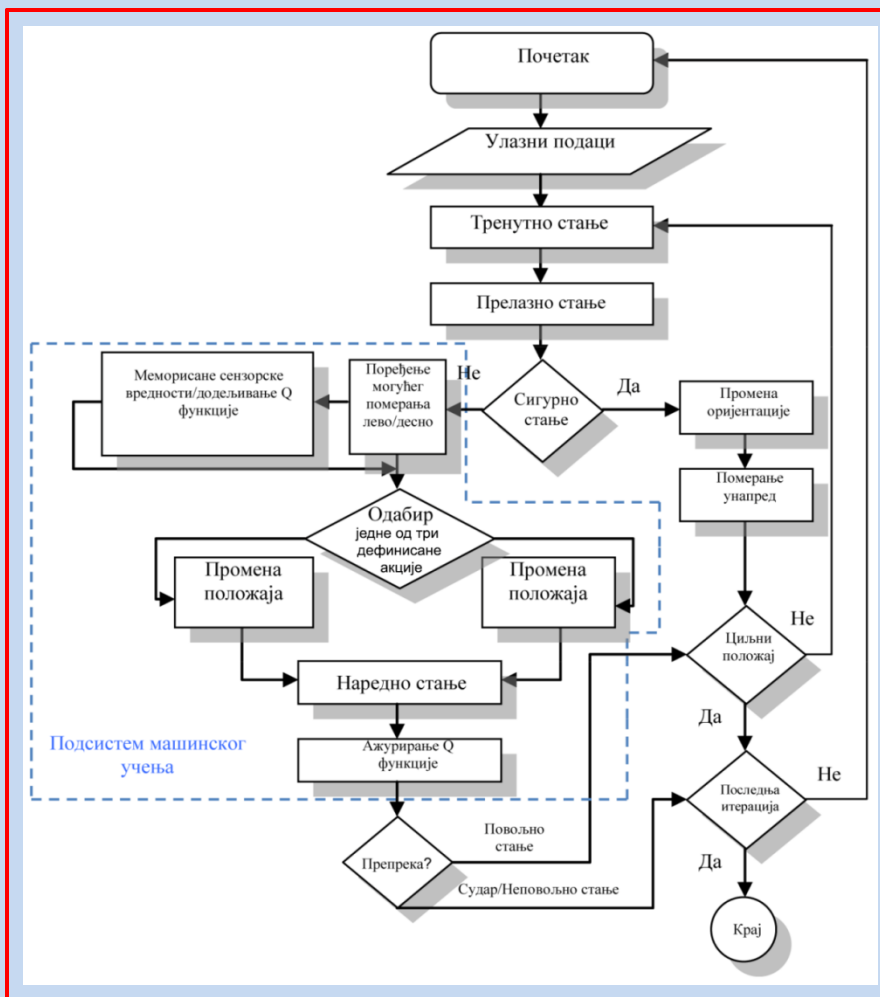
# Емпиријско управљање – експериментални резултати

- Мобилни робот *LEGO Mindstorms NXT*
- Ултразвучни сензор

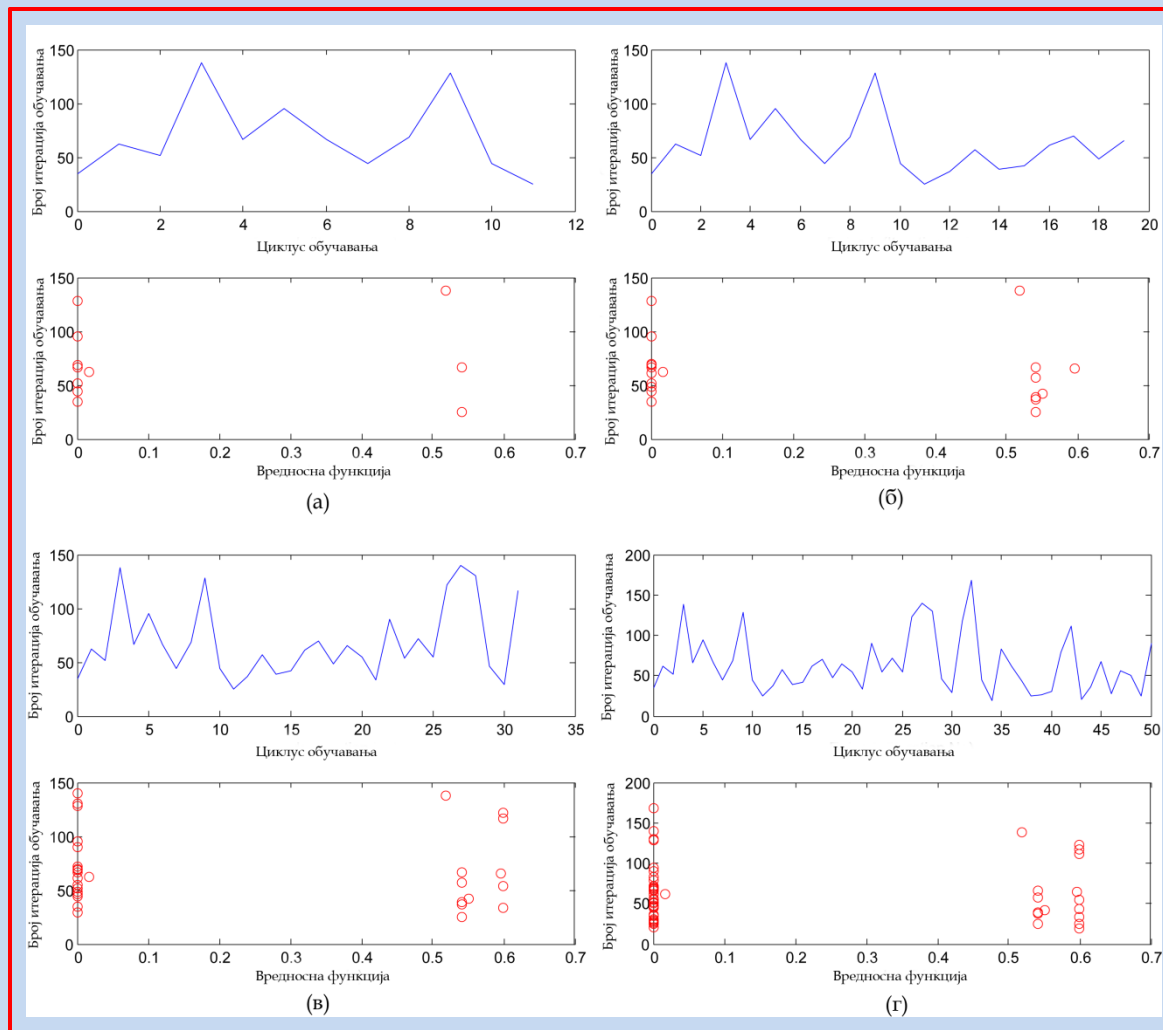


# Емпиријско управљање – експериментални резултати

## Оригинални алгоритам емпиријског управљања



# Емпиријско управљање – експериментални резултати



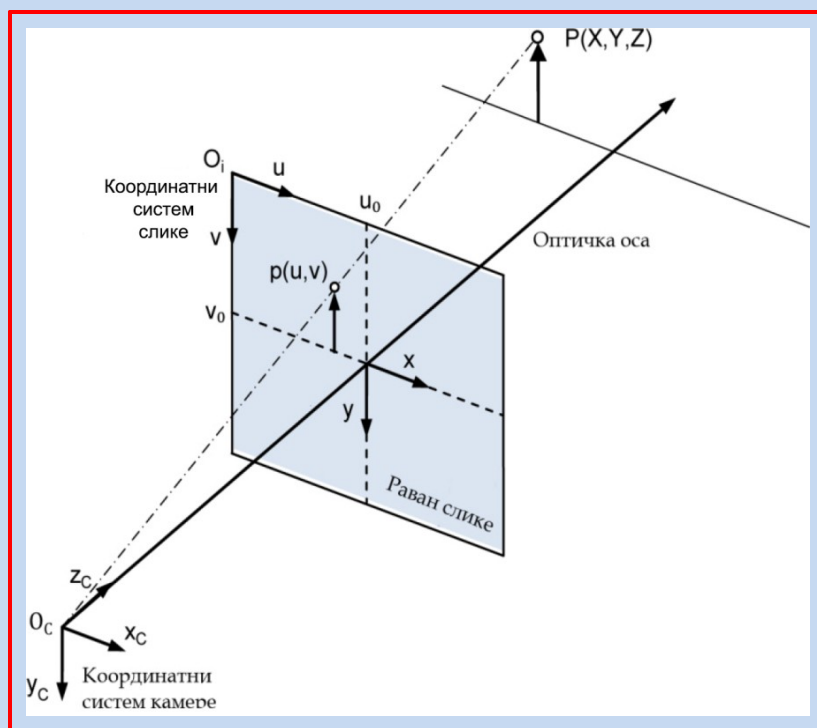


# Садржај

1. Увод – аутономност робота, емпиријско управљање, полазне хипотезе истраживања, остварени научни допринос;
2. Индустијски мобилни работи – унутрашњи транспорт материјала, интелигентни технолошки систем, дефинисање стања и модела промене стања мобилног робота;
3. Емпиријско управљање – теоријске основе, машинско учење ојачавањем, машинско учење демонстрацијом, вештачке неуронске мреже, симулациони и експериментални резултати оригиналног емпиријског управљачког система;
4. Управљање роботских система на основу информација добијених од камере – модел камере, алгоритми препознавања карактеристичних објеката, управљање на бази: грешке у параметрима слике, издвојених карактеристика са слике неопходних за оцењивање положаја карактеристичног објекта, еиполарне геометрије и хомографије.  
Експериментални резултати развијеног алгоритма емпиријског управљања;

# Управљање роботских система на основу информација добијених од камере

## Модел инфинитезимално малог отвора бленде (pinhole camera)



$$\mathbf{P} = [X \quad Y \quad Z]^T$$

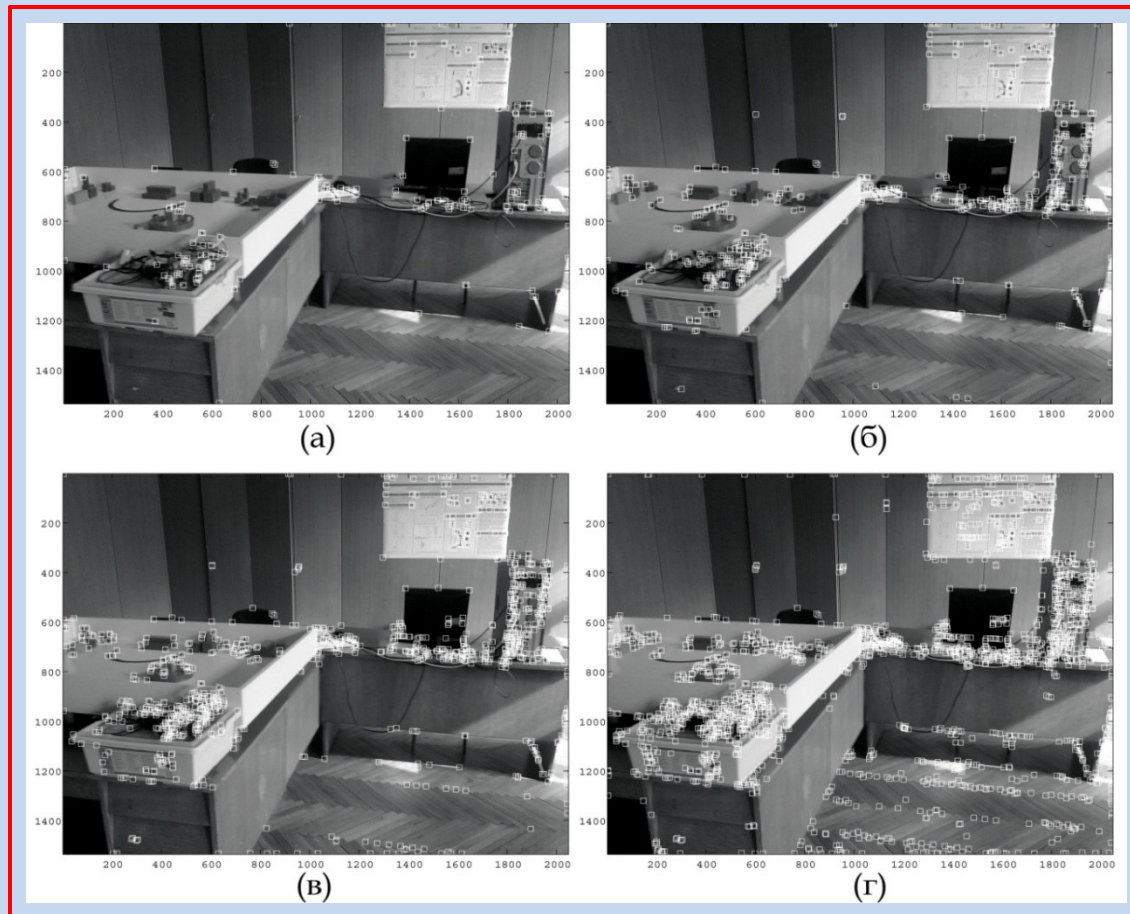
$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 \\ 0 & a_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

$$a_x = -f \cdot k_u \quad a_y = -f \cdot k_v$$

# Управљање роботских система на основу информација добијених од камере

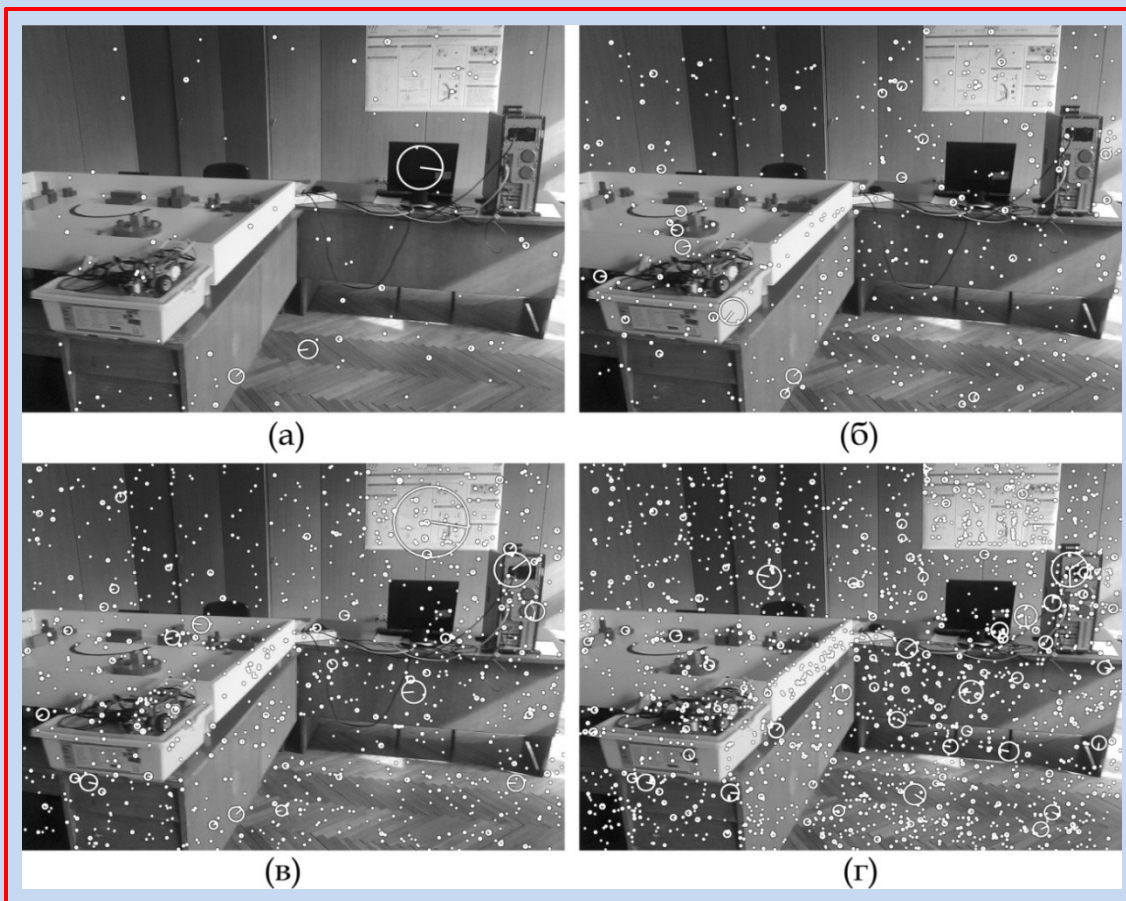
- Карактеристични објекат представља објекат у равни слике који се на неки оптималан начин разликује од осталих

- *Harris метода препознавања*



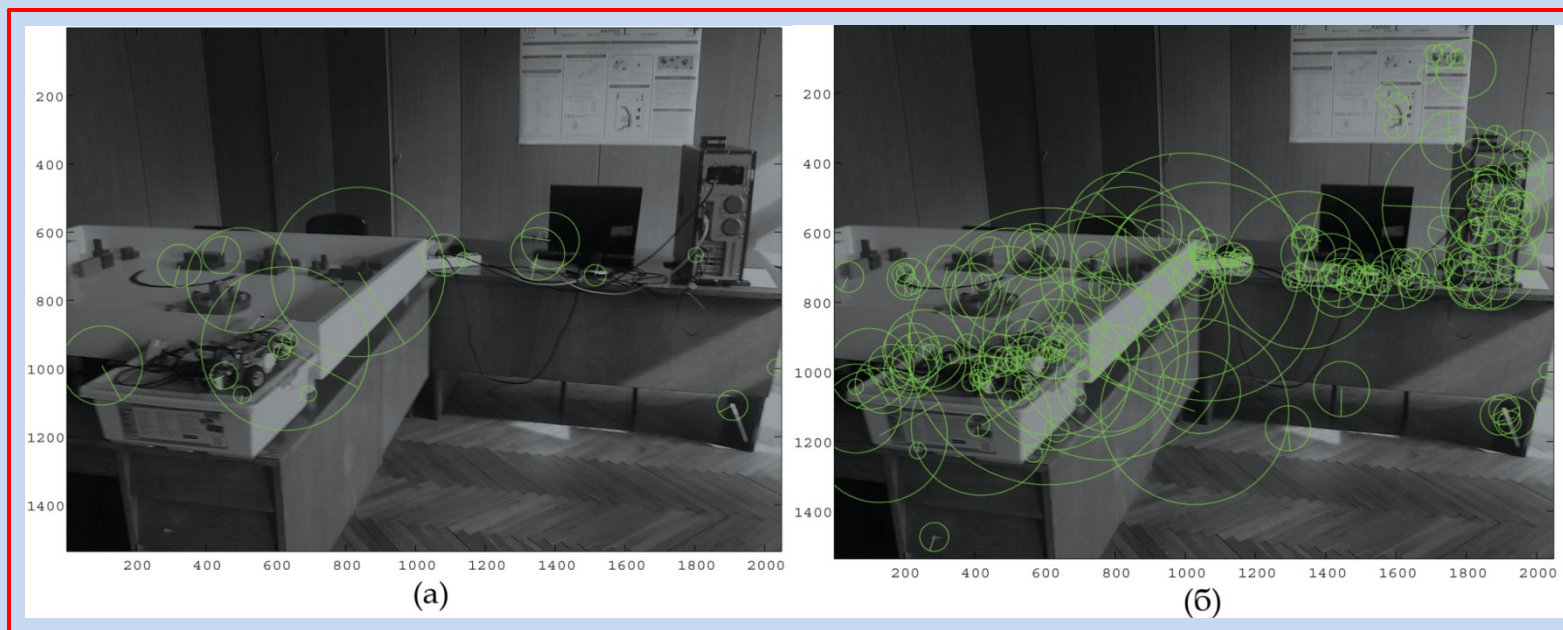
# Управљање роботских система на основу информација добијених од камере

## *SIFT* (Scale Invariant Feature Transform) алгоритам



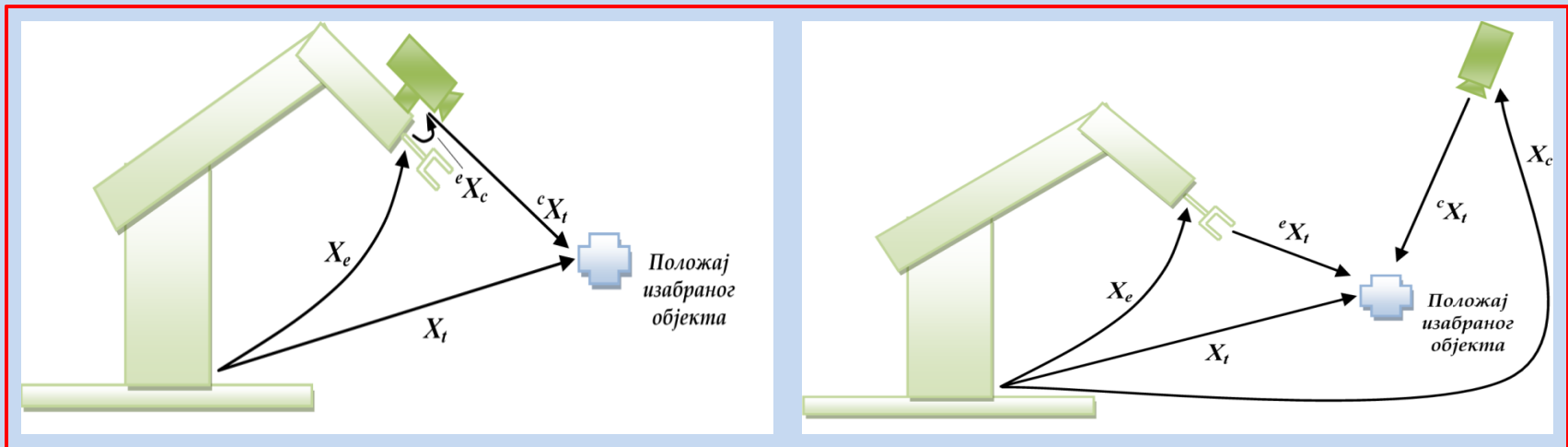
# Управљање роботских система на основу информација добијених од камере

## *SURF* (Speeded Up Robust Features) алгоритам



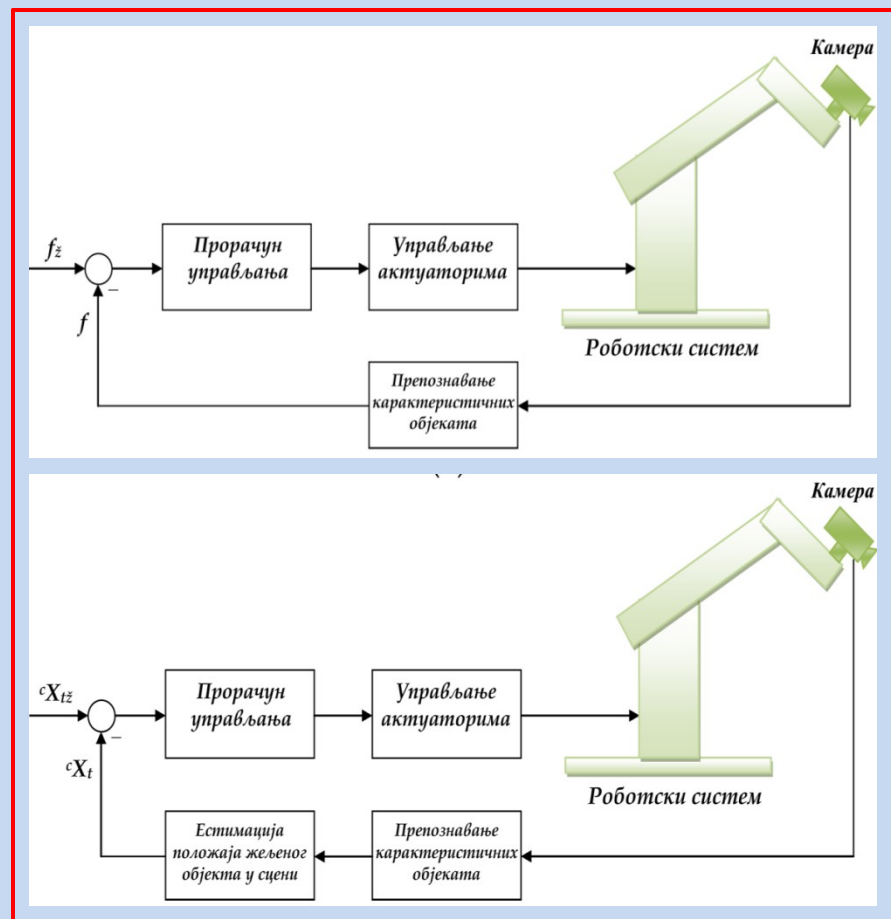
# Управљање роботских система на основу информација добијених од камере

- Положај камере у односу на роботски систем



# Управљање роботских система на основу информација добијених од камере

- Управљање на бази грешке у параметрима слике
- Управљање на бази издвојених карактеристика са слике неопходних за оцењивање положаја карактеристичног објекта



# Управљање роботских система на основу информација добијених од камере

## Управљање на бази грешке у параметрима слике

- Разлика између тренутних и жељених карактеристичних објеката

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{s} - \mathbf{s}^* \quad \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{L}_e \cdot \mathbf{v} \quad \mathbf{L}_e = \begin{bmatrix} -1/Z & 0 & x/Z & xy & -(1+x^2) & y \\ 0 & -1/Z & y/Z & 1+y^2 & -xy & -x \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{v} = -\lambda \hat{\mathbf{L}}_e^+ \mathbf{e}$$

Управљање на бази издвојених карактеристика са слике неопходних за оцењивање положаја карактеристичног објекта

$$\hat{\mathbf{L}}_e^{-1} = \begin{bmatrix} -\mathbf{I}_3 & \begin{bmatrix} {}^c \mathbf{t}_0 \\ \end{bmatrix}_x \mathbf{L}_{\theta \mathbf{u}}^{-1} \\ 0 & \mathbf{L}_{\theta \mathbf{u}}^{-1} \end{bmatrix}$$

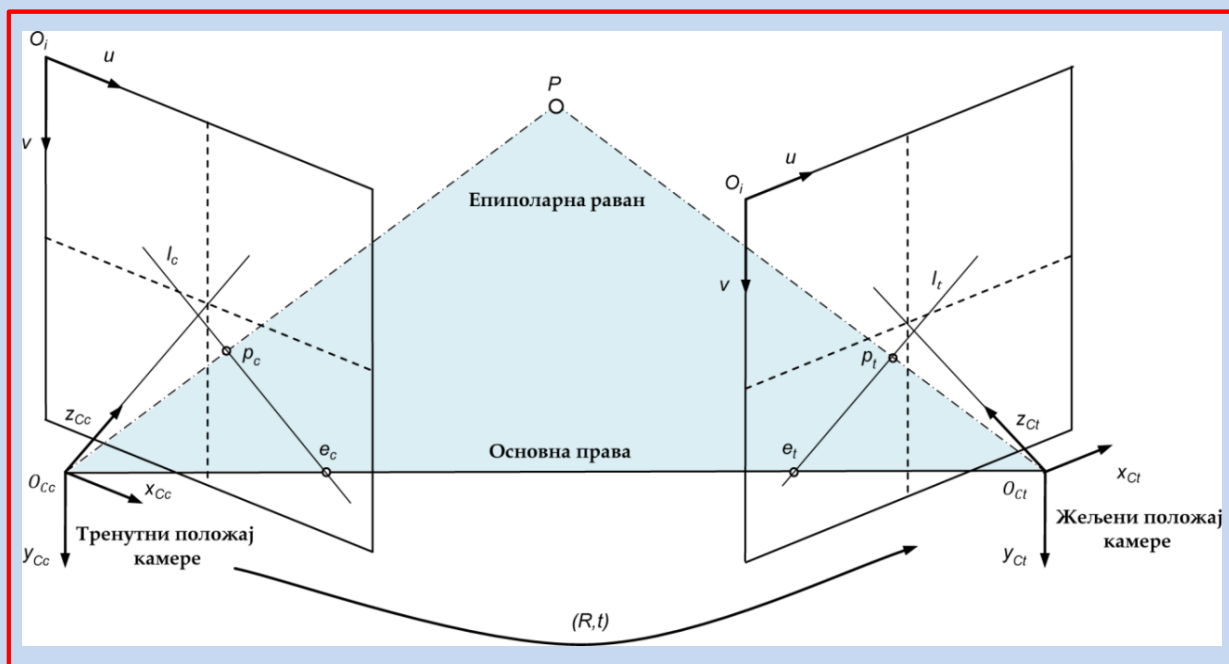
$$\mathbf{e} = \left[ {}^c \mathbf{t}_0 - {}^{c^*} \mathbf{t}_0, \theta_{\mathbf{u}} \right]$$

$$\mathbf{v} = -\lambda \hat{\mathbf{L}}_e^{-1} \mathbf{e}$$



# Управљање роботских система на основу информација добијених од камере

## Епиполарна геометрија и управљање на бази епипола



$$p_c^T F p_t = 0$$

$$F \cdot e_c = 0$$

$$F^T \cdot e_t = 0$$

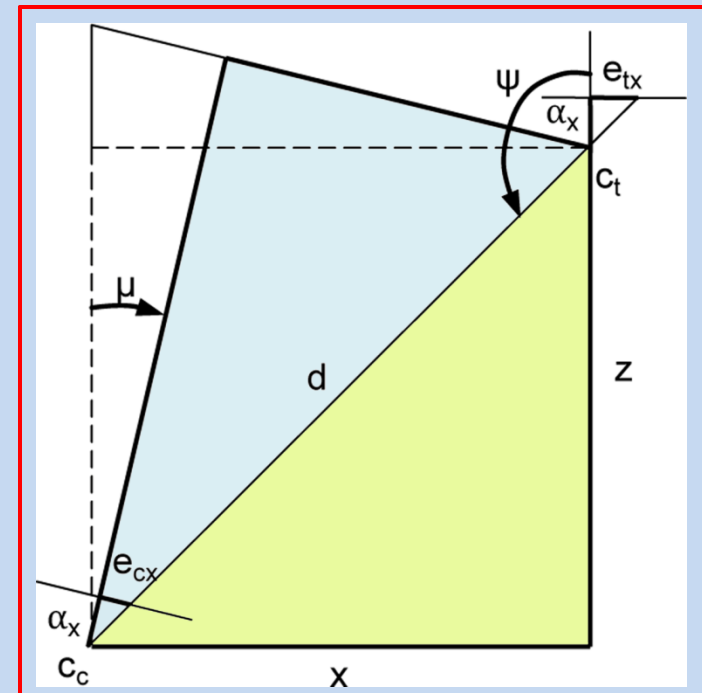
# Управљање роботских система на основу информација добијених од камере

## Еиполарна геометрија и управљање на бази еипола

$$e_{tx} = -\alpha_x \tan(\psi)$$

$$e_{cx} = \alpha_y \tan(\mu - \psi)$$

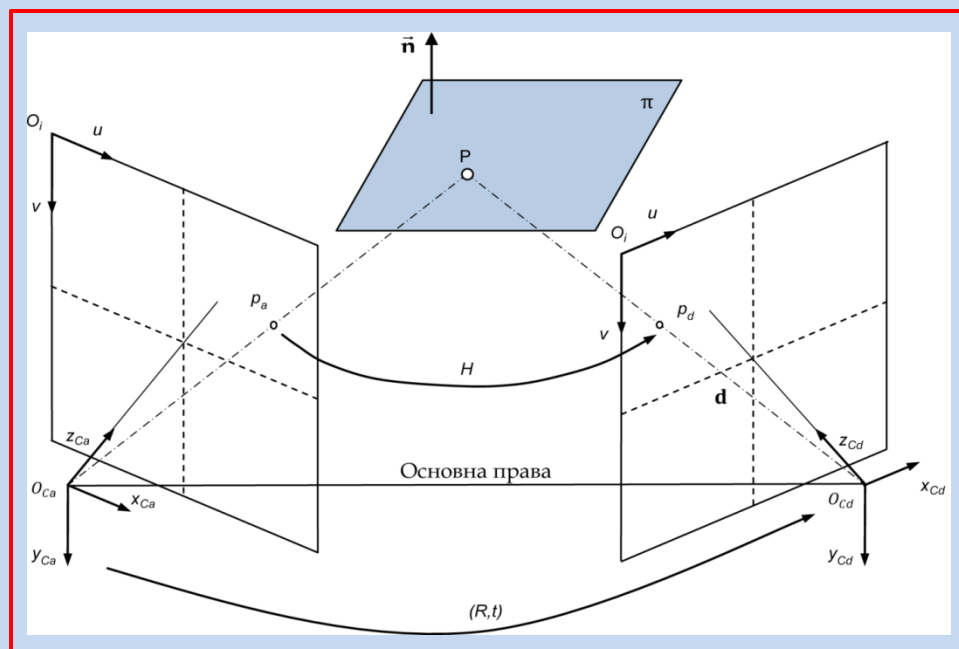
$$\mathbf{v}_e = \begin{bmatrix} v_{e1} \\ v_{e2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{e}_{cx}^d \\ \dot{e}_{tx}^d \end{bmatrix} - \mathbf{K}_f \begin{bmatrix} e_{cx} - e_{cx}^d \\ e_{tx} - e_{tx}^d \end{bmatrix}$$



# Управљање роботских система на основу информација добијених од камере

## Хомографија и управљање на бази хомографије

$$p_d = \mathbf{H}_{3 \times 3} p_a$$

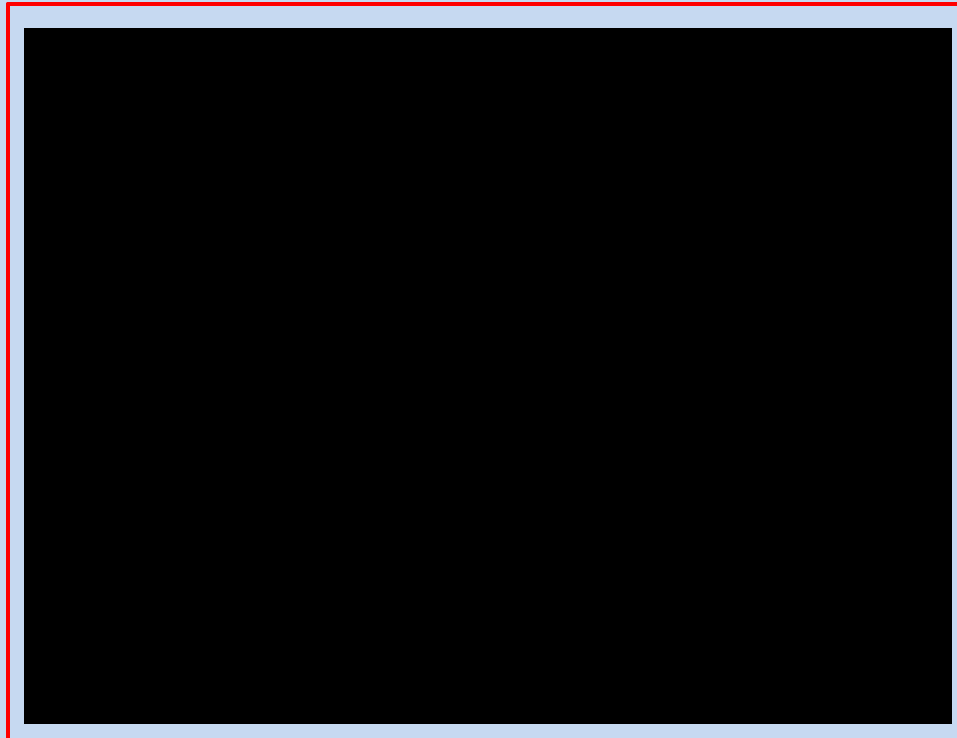


$$\mathbf{H} = \mathbf{K} \left( \mathbf{R} - \mathbf{t} \frac{\mathbf{n}^T}{d} \right) \mathbf{K}^{-1} = \mathbf{K} \left( \mathbf{R} + \mathbf{R} \mathbf{c} \frac{\mathbf{n}^T}{d} \right) \mathbf{K}^{-1} = \mathbf{K} \mathbf{R} \left( \mathbf{I} + \mathbf{c} \frac{\mathbf{n}^T}{d} \right) \mathbf{K}^{-1}$$

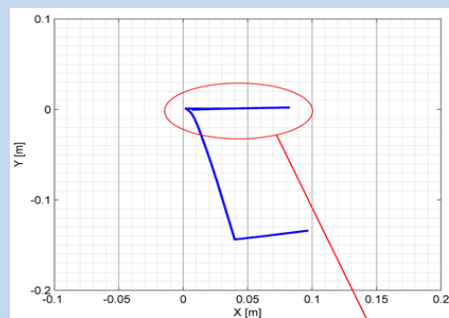
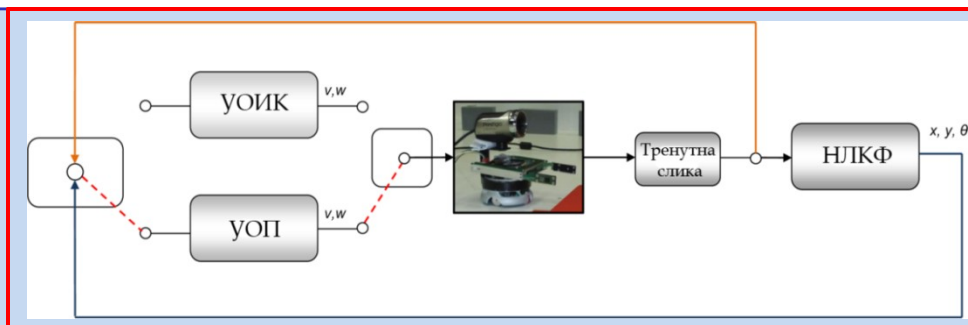
$$v = -k_v (h_{11} - h_{33})$$

# Управљање роботских система на основу информација добијених од камере

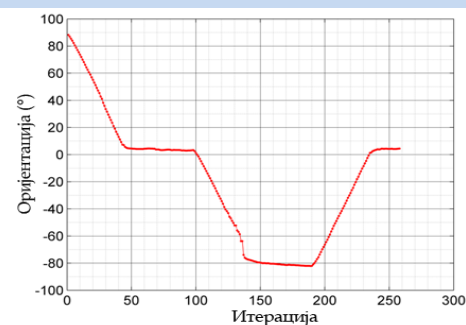
- Симулација развијена у *MATLAB*<sup>®</sup> софтверском пакету



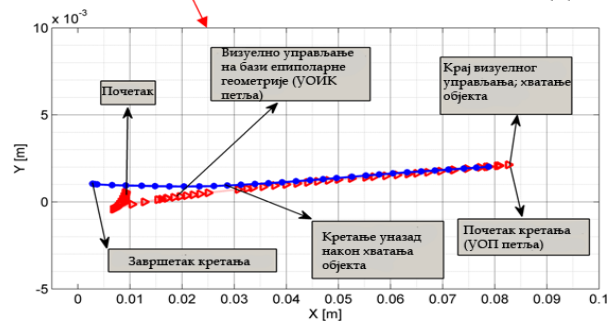
# Експериментални резултати



(a)

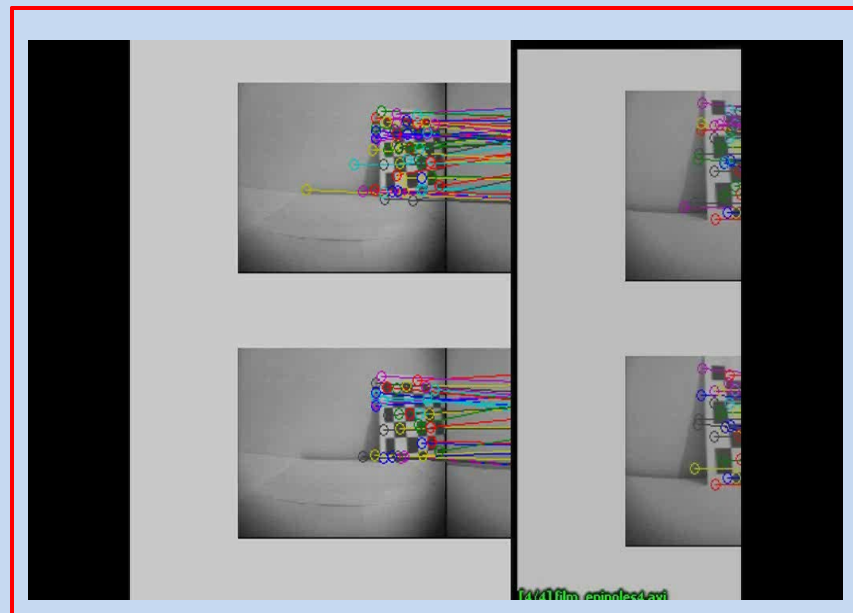
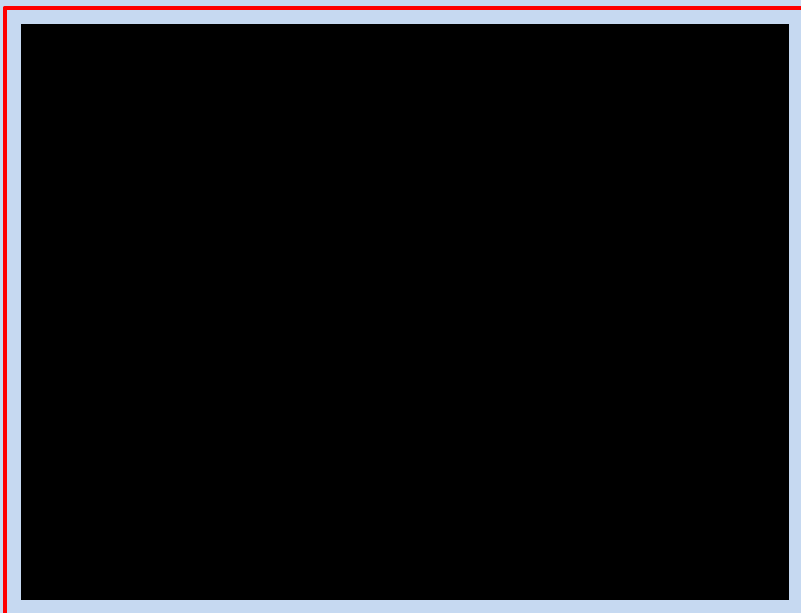


(б)



(в)

# Експериментални резултати



\* Miljković, Z., Vuković, N., Mitić, M., Babić, B., New hybrid vision-based control approach for automated guided vehicles, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, Issues: 1-4, pp. 231-249, Springer-Verlag London Ltd., April 2013.

5. Нови хибридни емпиријски управљачки систем робота вертикалне зглобне конфигурације базиран на информацијама добијеним од камере – *симулациони и експериментални резултати*;
6. Управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и информација добијених од камере – *експериментални резултати*;
7. Репродукција жељене трајекторије и визуелно навођење интелигентног мобилног робота на бази биолошки инспирисаног алгоритма и хомографије – *теорија ројева и алгоритми оптимизације, одређивање глобалног оптимума нелинеарне функције применом алгоритма оптимизације колонијом свитаца, оригинални систем емпиријског управљања интелигентног мобилног робота*;
8. Закључак и правци будућих истраживања

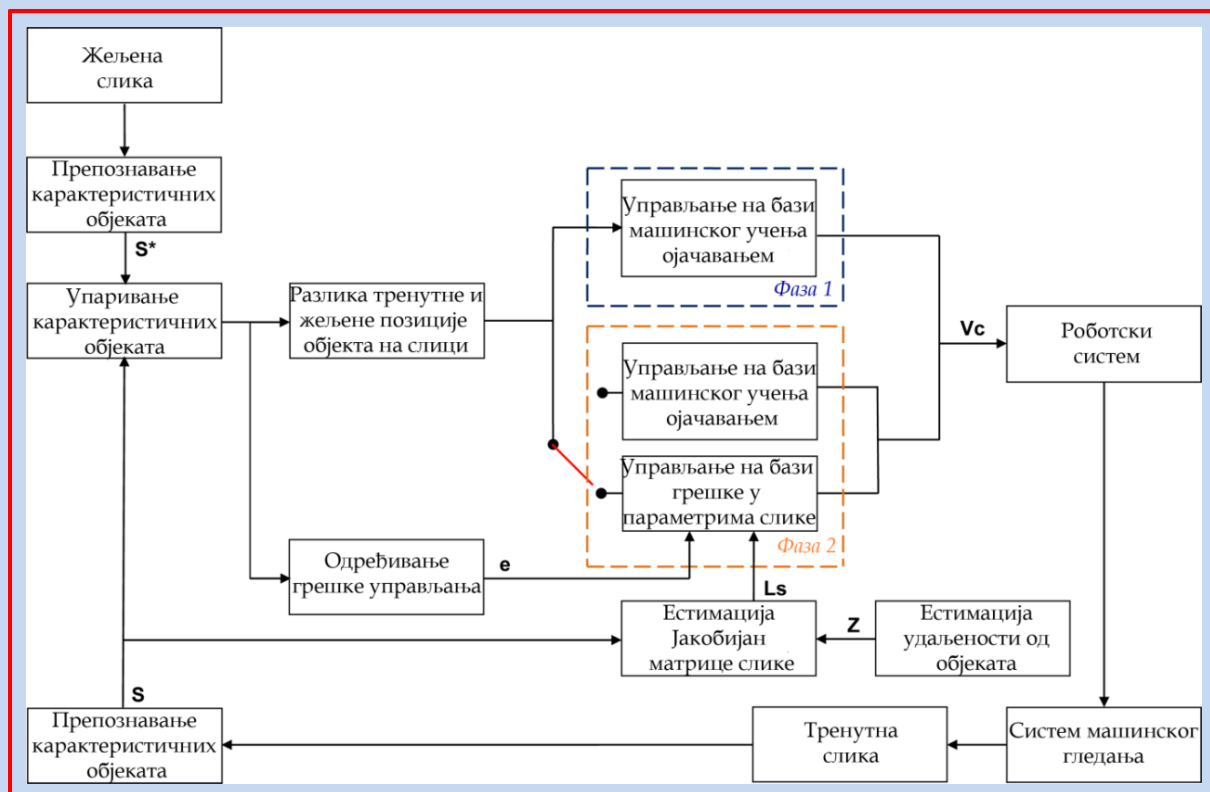
# Нови хибридни емпиријски управљачки систем работа вертикалне зглобне конфигурације

- Постоје многобројни проблеми везани за имплементацију основних алгоритама визуелног управљања
- Прорачун управљања зависи од: резолуције камере, величине пискела, фокалне дужине камере, промене амбијенталног осветљења, постојања шума у процесу аквизиције сигнала, итд.
- Предложено решење: имплементација алгоритама машинског учења у процес концепцијског пројектовања управљачког система



# Нови хибридни емпиријски управљачки систем работа вертикалне зглобне конфигурације

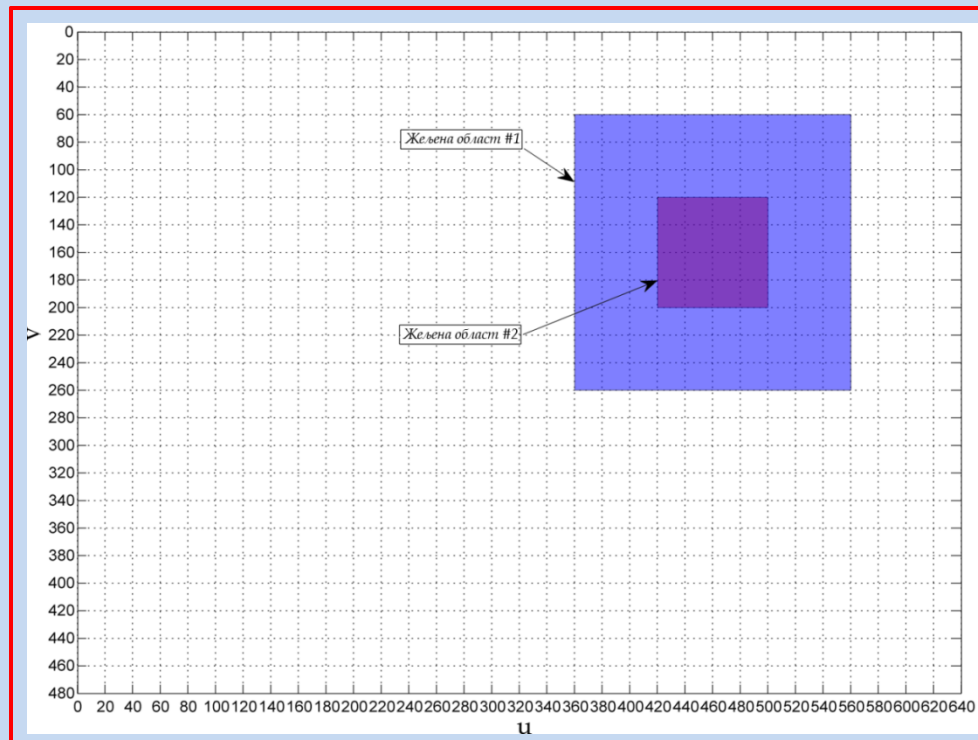
Оригинални хибридни управљачки систем на бази машинског учења ојачавањем и информација добијених од камере



# Нови хибридни емпиријски управљачки систем робота вертикалне зглобне конфигурације

- Q-учење и *SARSA* алгоритам
- Вештачка неуронска мрежа са простирањем грешке уназад (backpropagation)

$$Q(\mathbf{x}_t, a_t) = r_t + \gamma \max_{a_{t+1}} Q(\mathbf{x}_{t+1}, a_{t+1})$$

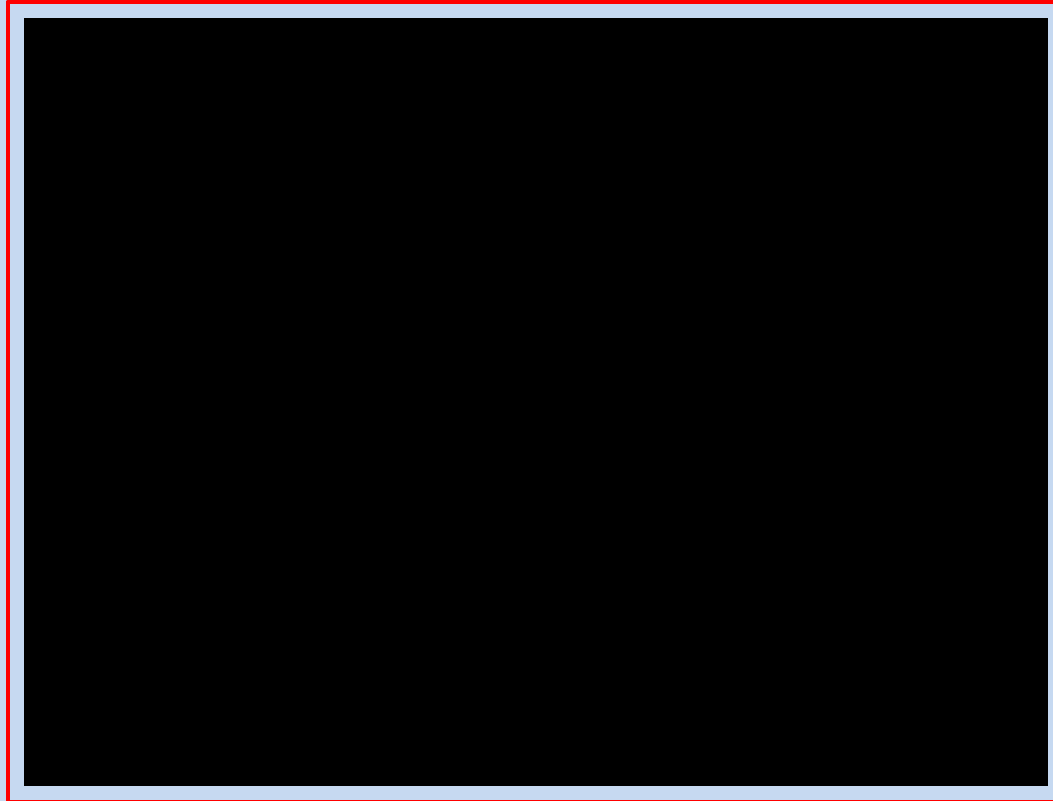


$$r = \begin{cases} +100, & \text{ако тр\_стање} \in \text{жел\_области} \\ +30, & \text{ако раст(тр\_стање, жел\_области)} < \text{раст(пр\_стање, жел\_области)} \\ -30, & \text{ако раст(тр\_стање, жел\_области)} > \text{раст(пр\_стање, жел\_области)} \\ 0, & \text{ако раст(тр\_стање, жел\_области)} = \text{раст(пр\_стање, жел\_области)} \end{cases}$$

# Нови хибридни емпиријски управљачки систем работа вертикалне зглобне конфигурације

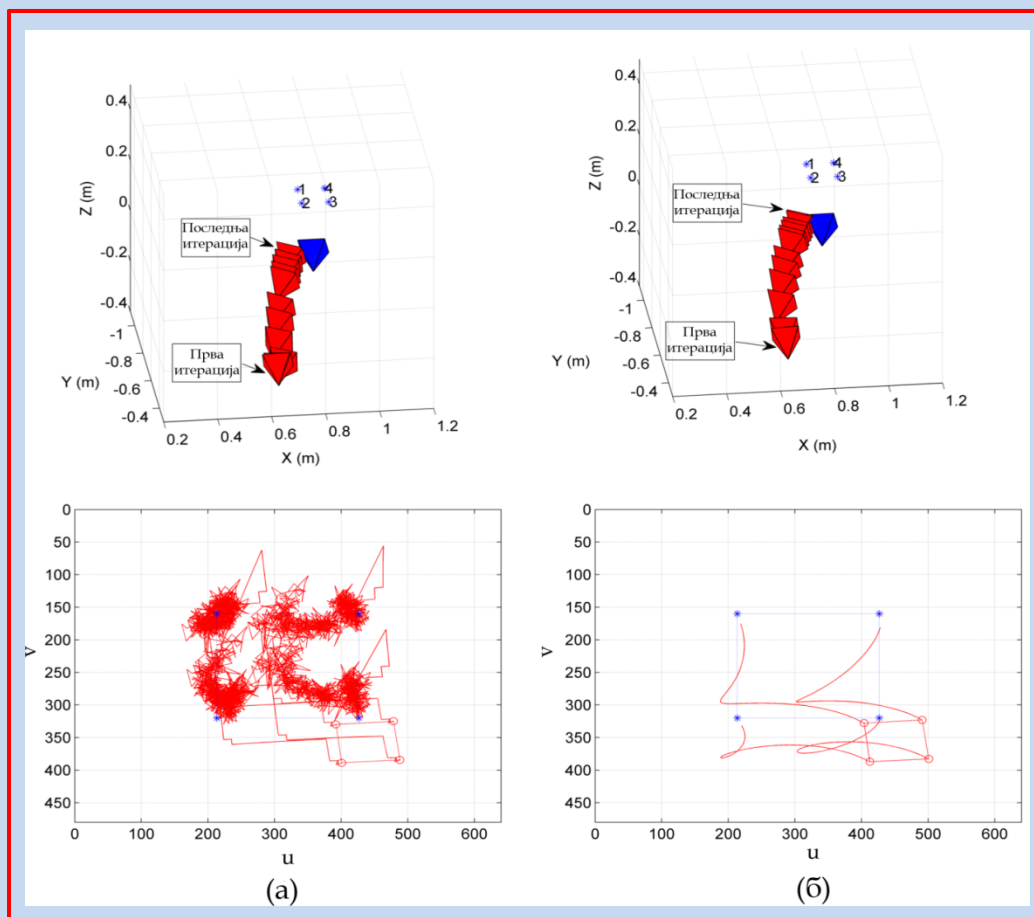
- Симулација развијена у *MATLAB*<sup>®</sup> софтверском пакету
- Анализирани су три независне симулационе студије: (i) случај када постоје пројекције свих карактеристичних објеката у равни слике, (ii) проблем видног поља камере (*field-of-view camera problem*), и (iii) поређење са традиционалним приступом управљања на бази информација добијених од камере
- Анализирани су проблеми: постојања шума у процесу аквизиције сигнала, погрешне оцене калибрационе матрице, управљања услед нетачног растојања до жељеног положаја.

# Нови хибридни емпиријски управљачки систем робота вертикалне зглобне конфигурације



# Нови хибридни емпиријски управљачки систем робота вертикалне зглобне конфигурације

- Поређење са традиционалним приступом



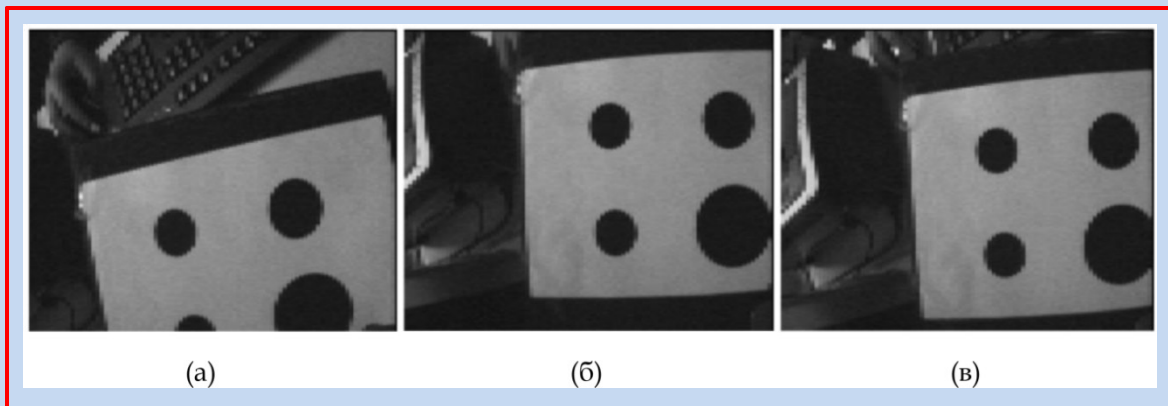
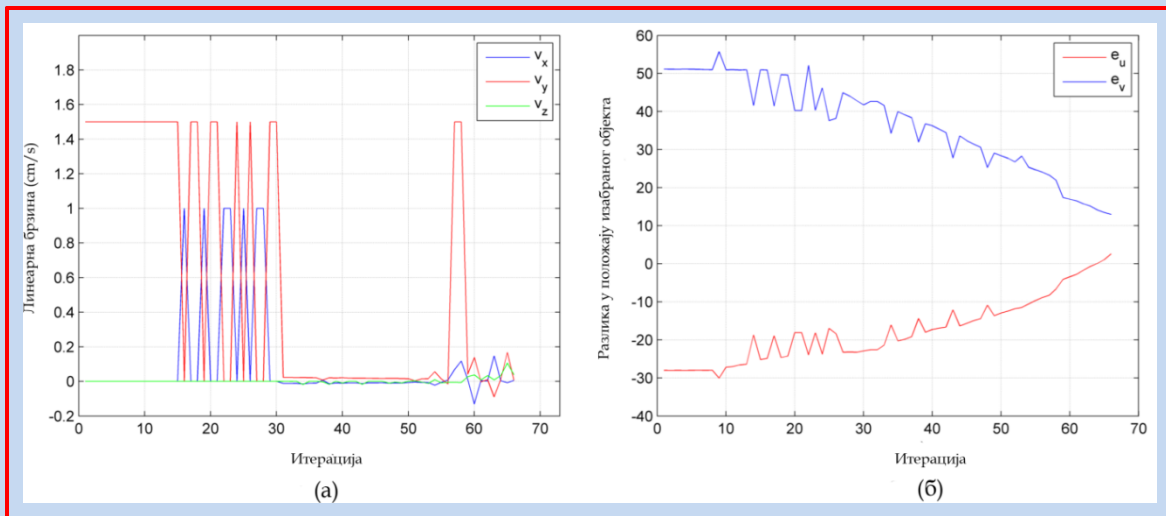
# Нови хибридни емпиријски управљачки систем робота вертикалне зглобне конфигурације

- Експериментални резултати су остварени коришћењем робота вертикалне зглобне конфигурације *NeuroArm Manipulator*

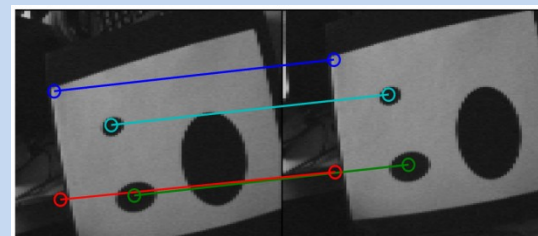
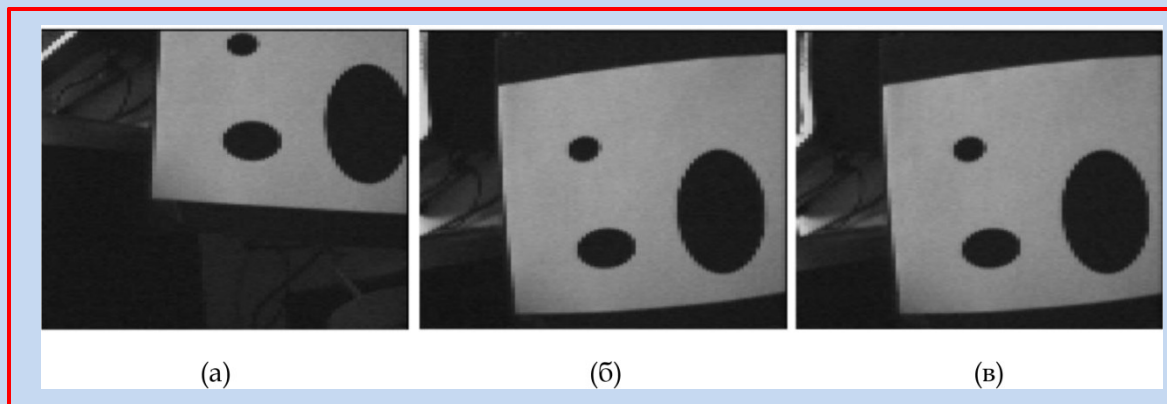
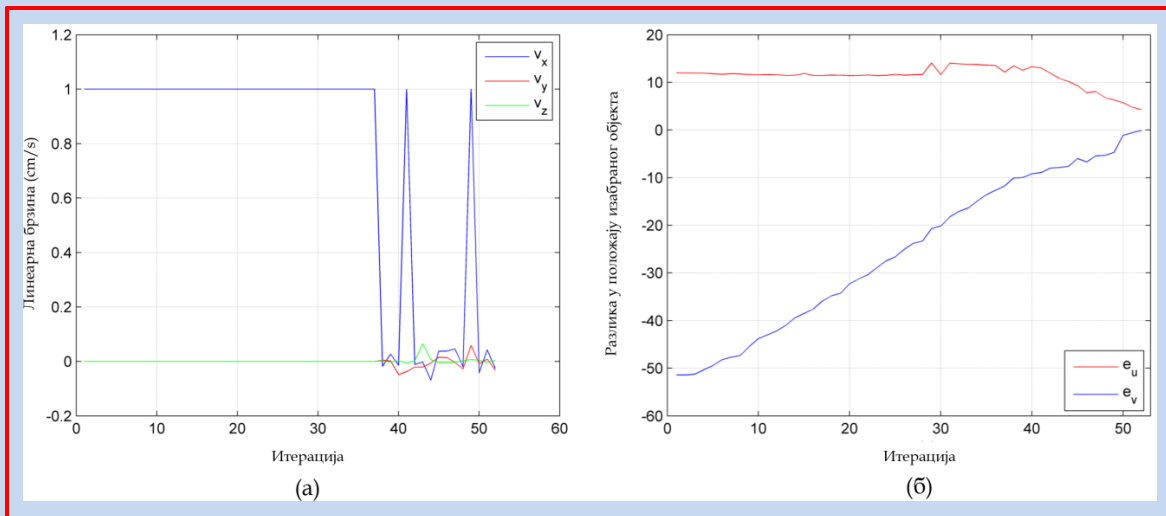


\* Miljković, Z., Mitić, M., Lazarević, M., Babić, B., Neural network reinforcement learning for visual control of robot manipulators, *Journal Expert Systems with Applications* (ISSN 0957-4174), Vol. 40, Issue 5, pp. 1721-1736, Elsevier, April 2013.

# Нови хибридни емпиријски управљачки систем робота вертикалне зглобне конфигурације



# Нови хибридни емпиријски управљачки систем робота вертикалне зглобне конфигурације



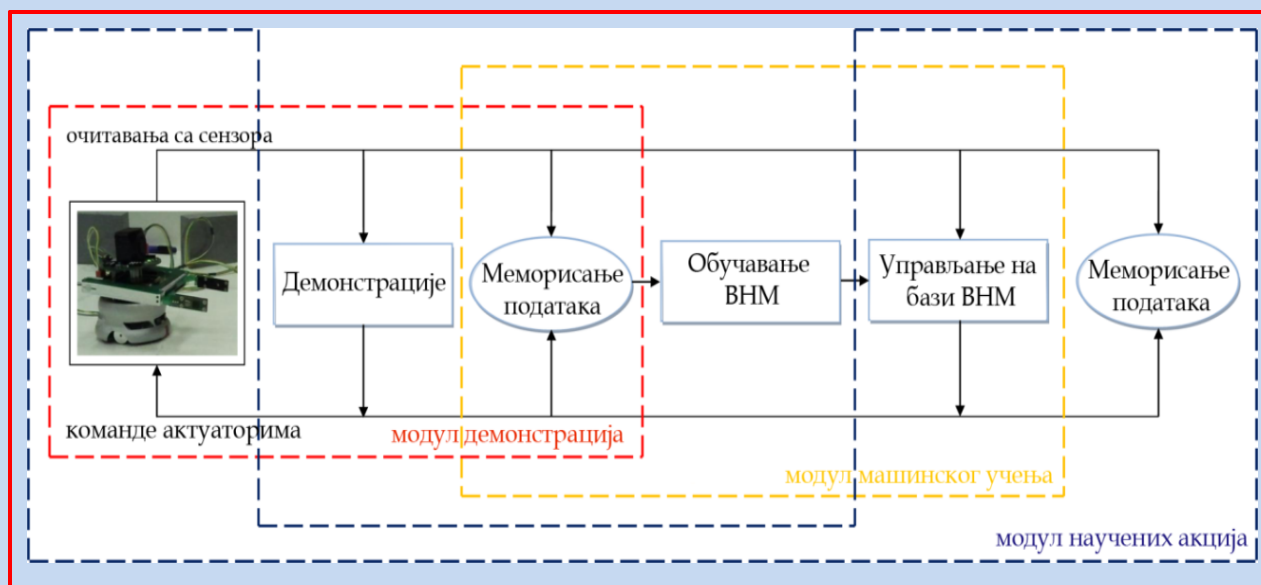


# Садржај

5. Нови хибридни емпиријски управљачки систем робота вертикалне зглобне конфигурације базиран на информацијама добијеним од камере – *симулациони и експериментални резултати*;
6. Управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и информација добијених од камере – *експериментални резултати*;
7. Репродукција жељене трајекторије и визуелно навођење интелигентног мобилног робота на бази биолошки инспирисаног алгоритма и хомографије – *теорија ројева и алгоритми оптимизације, одређивање глобалног оптимума нелинеарне функције применом алгоритма оптимизације колонијом свитаца, оригинални систем емпиријског управљања интелигентног мобилног робота*;
8. Закључак и правци будућих истраживања

# Управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и информација добијених од камере

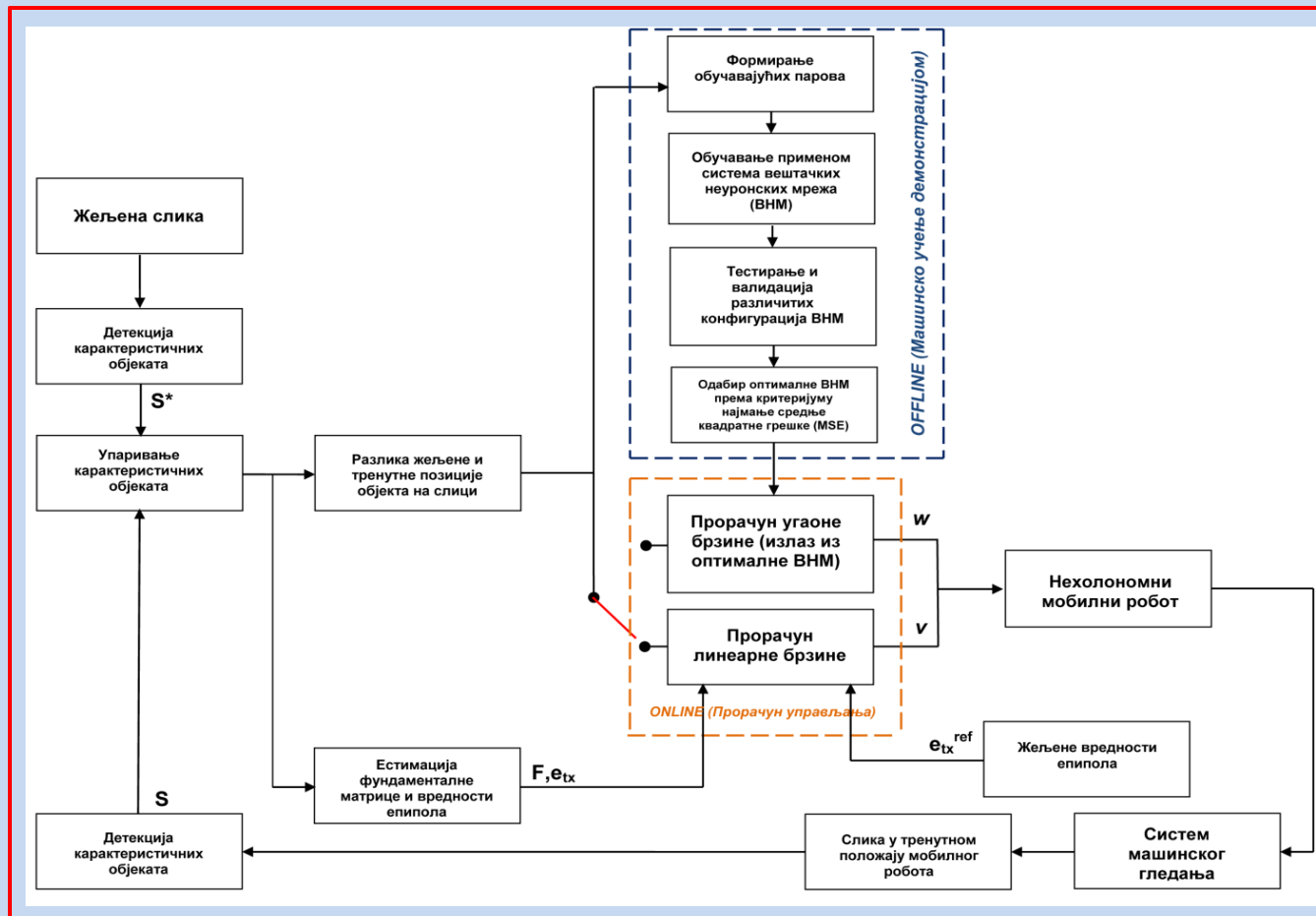
- Машинско учење демонстрацијом и епиполарна геометрија
- Корекција оријентације робота применом техника машинског учења



\* Mitić, M., Miljković, Z., Neural network learning from demonstration and epipolar geometry for visual control of a nonholonomic mobile robot, *Journal Soft Computing*, Vol.18, Issue 5, pp. 1011-1025, Springer-Verlag London Ltd., May 2014.

# Управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и информација добијених од камере

## Оригинални емпиријски управљачки систем мобилног робота

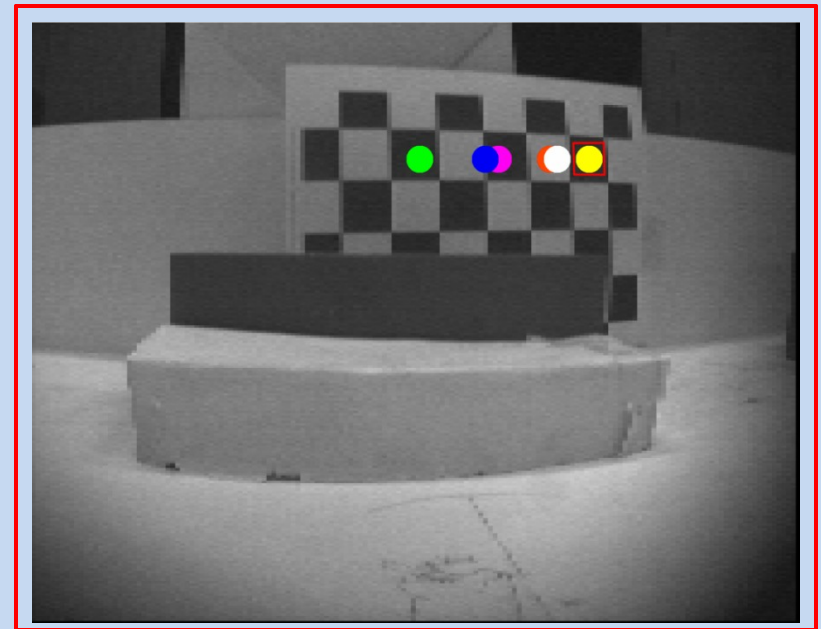
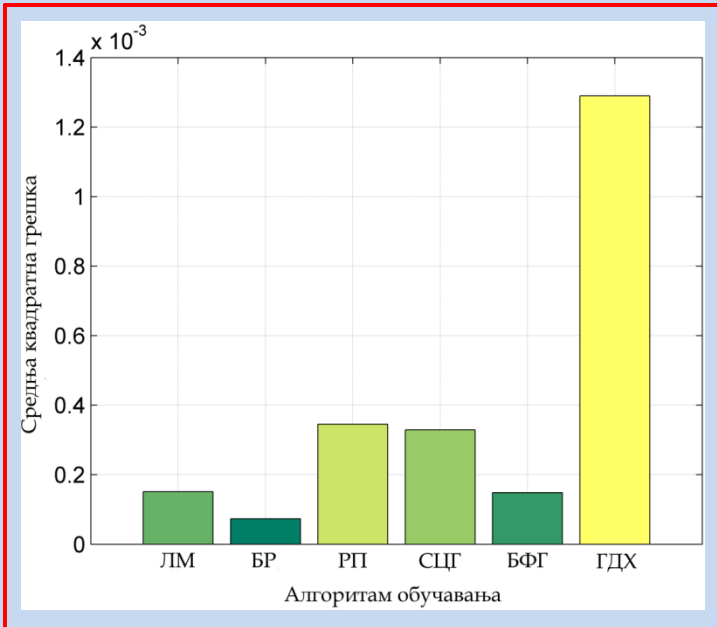


# Управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и информација добијених од камере

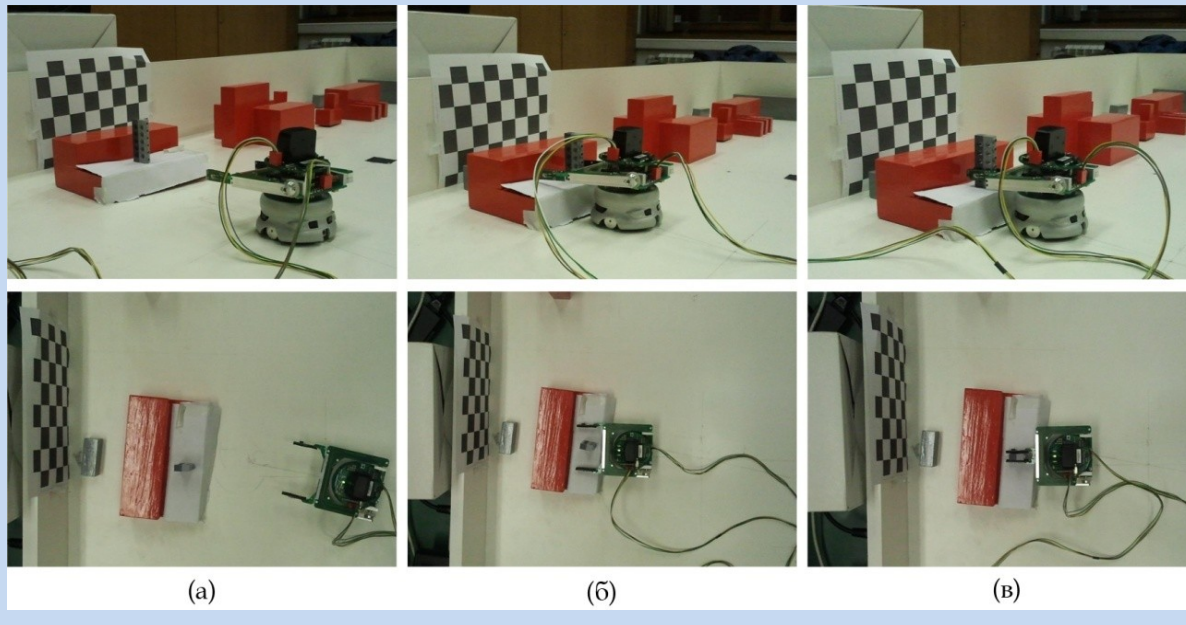
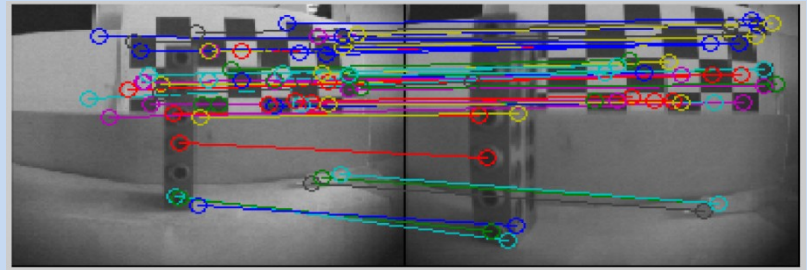
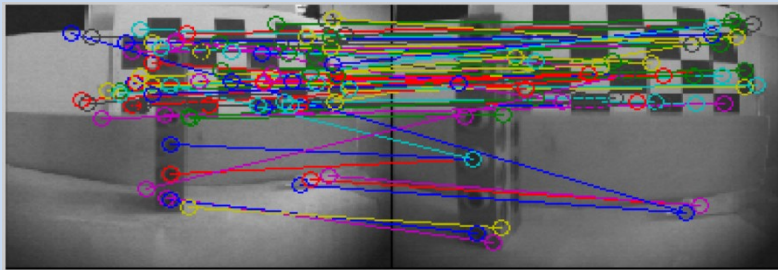
- Обучавајући пар ВНМ чини: улаз - разлика између тренутне и жељене позиције карактеристичног објекта, излаз – управљачка команда за корекцију оријентације
- Тестирано је укупно 6 различитих алгоритама машинског учења и 18 различитих архитектура ВНМ

Алгоритми обучавања вештачке неуронске мреже		
Р.б.	Алгоритам учења	Скраћеница
1	Левенберг-Маркеов алгоритам	LM
2	Бајесова регуларизација	BR
3	Адаптибилни Backpropagation алгоритам	RP
4	Скалирани градијентни поступак спајања	SCG
5	BFGS квази-Њутн Backpropagation	BFG
6	Backpropagation са варијабилним параметром учења	GDX

# Управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и информација добијених од камере



# Управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и информација добијених од камере

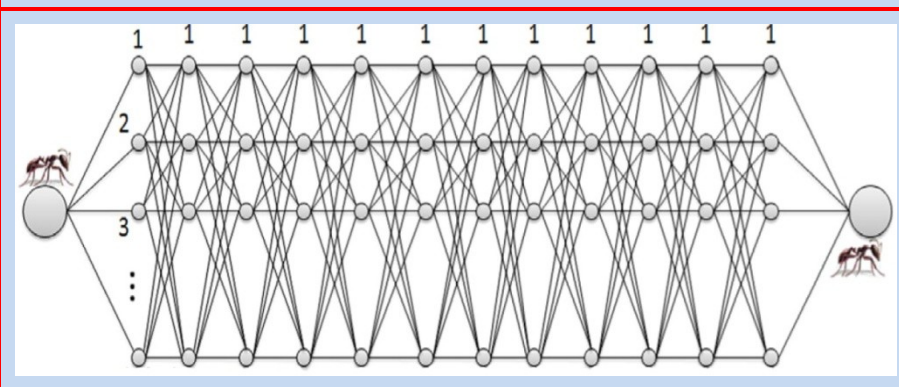
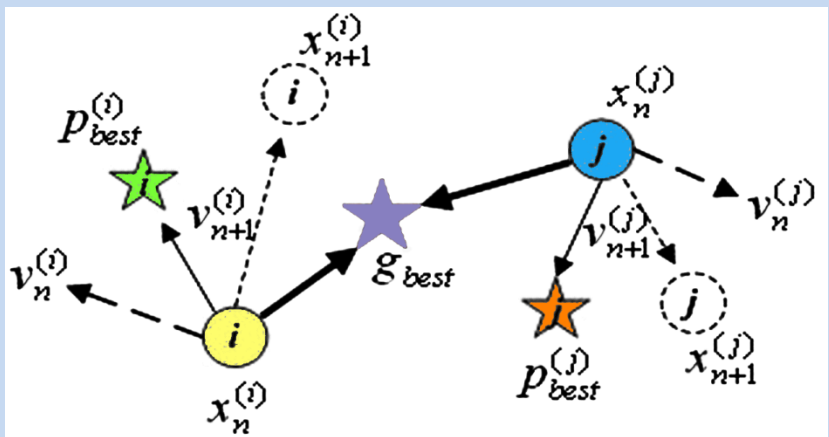


# Садржај

5. Нови хибридни емпиријски управљачки систем робота вертикалне зглобне конфигурације базиран на информацијама добијеним од камере – *симулациони и експериментални резултати*;
6. Управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и информација добијених од камере – *експериментални резултати*;
7. Репродукција жељене трајекторије и визуелно навођење интелигентног мобилног робота на бази биолошки инспирисаног алгоритма и хомографије – *теорија ројева и алгоритми оптимизације, одређивање глобалног оптимума нелинеарне функције применом алгоритма оптимизације колонијом свитаца, оригинални систем емпиријског управљања интелигентног мобилног робота*;
8. Закључак и правци будућих истраживања

# РЕПРОДУКЦИЈА ЖЕЉЕНЕ ТРАЈЕКТОРИЈЕ И ВИЗУЕЛНО НАВОЂЕЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ МОБИЛНОГ РОБОТА НА БАЗИ БИОЛОШКИ ИНСПИРИСАНОГ АЛГОРИТМА И ХОМОГРАФИЈЕ

- Теорија ројева (*Swarm Intelligence*): GA, PSO, ACO,...
- Математичко-алгоритамске процедуре које се базирају на колективној интелигенцији скупа појединачних јединки

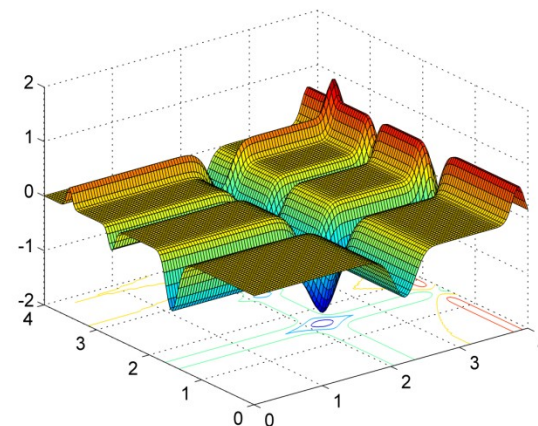
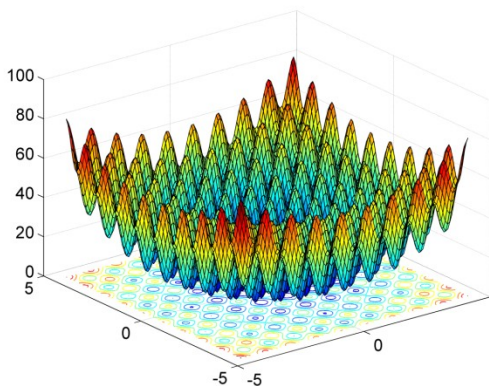
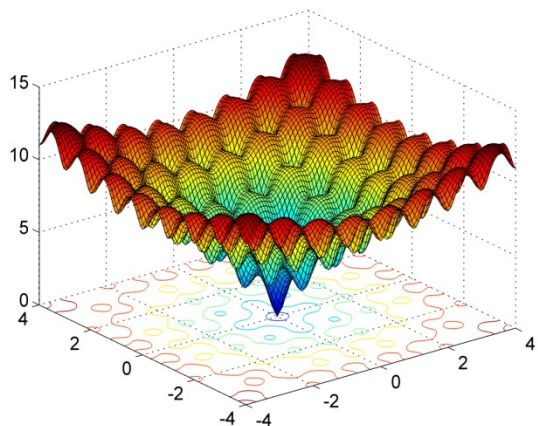




# РЕПРОДУКЦИЈА ЖЕЉЕНЕ ТРАЈЕКТОРИЈЕ И ВИЗУЕЛНО НАВОЂЕЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ МОБИЛНОГ РОБОТА НА БАЗИ БИОЛОШКИ ИНСПИРИСАНОГ АЛГОРИТМА И ХОМОГРАФИЈЕ

- Метакхеуристички алгоритам оптимизације колонијом свитаца (*Firefly algorithm*)
- Промена положаја јединке дефинисана је са

$$x_i = x_i + \beta_o e^{-\gamma r^2} (x_j - x_i) + \alpha \varepsilon_i$$



# РЕПРОДУКЦИЈА ЖЕЉЕНЕ ТРАЈЕКТОРИЈЕ И ВИЗУЕЛНО НАВОЂЕЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ МОБИЛНОГ РОБОТА НА БАЗИ БИОЛОШКИ ИНСПИРИСАНОГ АЛГОРИТМА И ХОМОГРАФИЈЕ

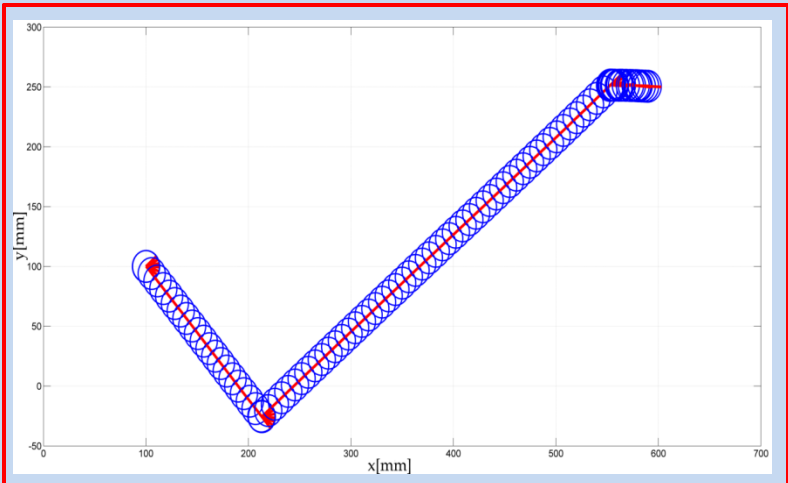
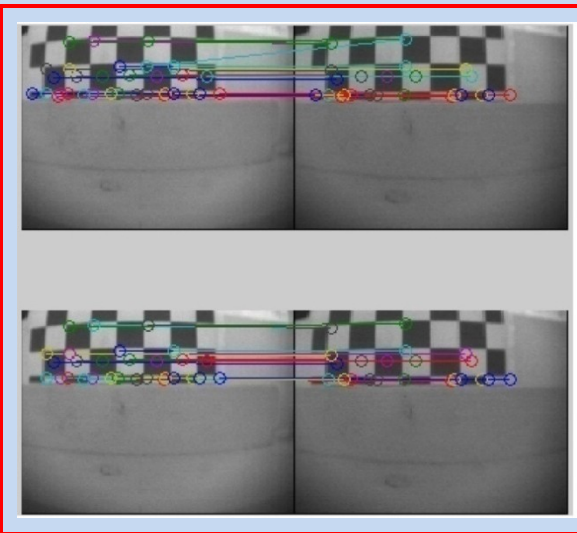
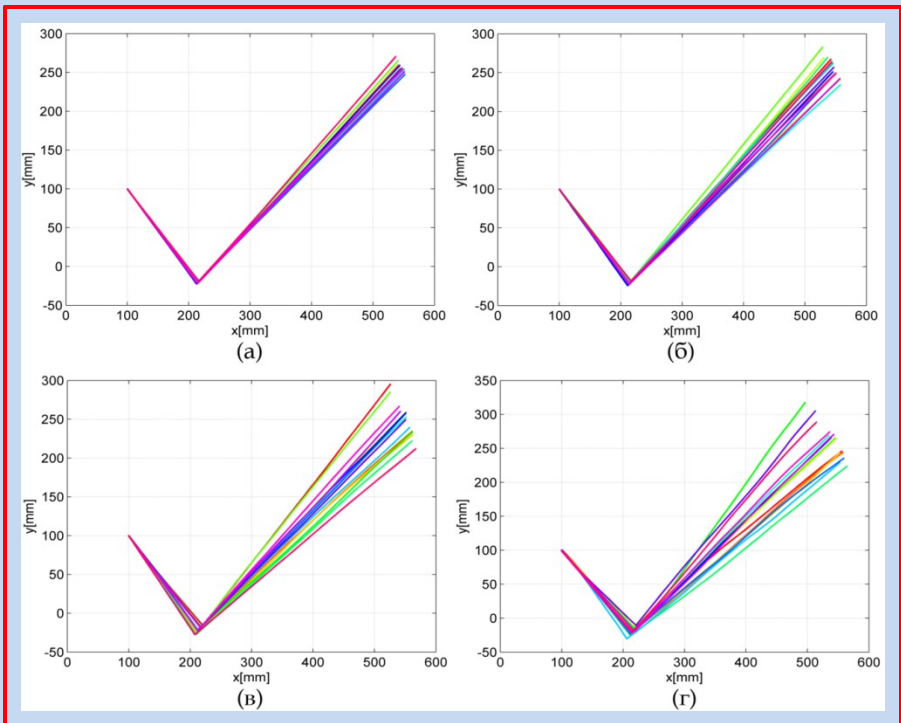


# РЕПРОДУКЦИЈА ЖЕЉЕНЕ ТРАЈЕКТОРИЈЕ И ВИЗУЕЛНО НАВОЂЕЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ МОБИЛНОГ РОБОТА НА БАЗИ БИОЛОШКИ ИНСПИРИСАНОГ АЛГОРИТМА И ХОМОГРАФИЈЕ

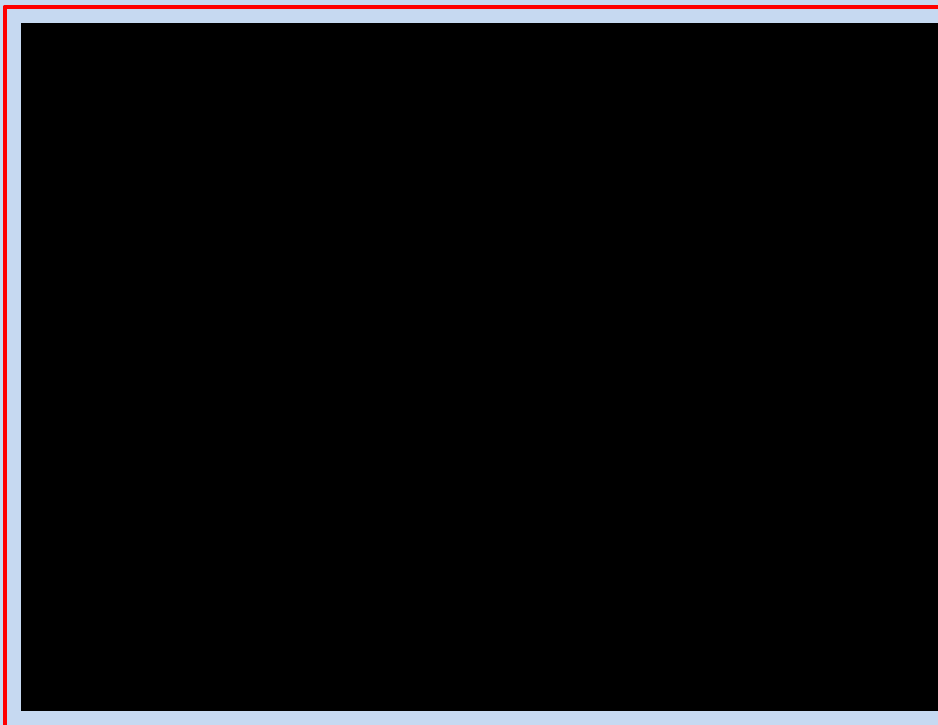
- Третирани су проблеми навигације (машинског учења и репродукција трајекторије) и визуелног навођења мобилног робота
- Решење се базира на примени техника машинског учења демонстрацијом и алгоритма оптимизације колонијом свитаца
- Проблем навигације: функција циља (циљ оптимизације) је минимална грешка у крајњем положају (позицији и оријентацији) мобилног робота
- Проблем визуелног навођења: функција циља је генерисање управљачких команди за корекцију оријентације мобилног робота
- Резултат спроведених истраживања:

Успешна манипулација радним предметом у лабораторијском моделу технолошког окружења применом оригиналног емпиријског алгоритма управљања интелигентног мобилног робота

# РЕПРОДУКЦИЈА ЖЕЉЕНЕ ТРАЈЕКТОРИЈЕ И ВИЗУЕЛНО НАВОЋЕЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ МОБИЛНОГ РОБОТА НА БАЗИ БИОЛОШКИ ИНСПИРИСАНОГ АЛГОРИТМА И ХОМОГРАФИЈЕ



- Нови емпиријски управљачки систем мобилног робота карактеришу својства *адаптабилности*, *флексибилности* и *робустности*

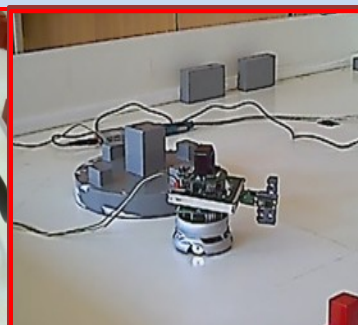


# Садржај

5. Нови хибридни емпиријски управљачки систем робота вертикалне зглобне конфигурације базиран на информацијама добијеним од камере – *симулациони и експериментални резултати*;
6. Управљање интелигентног мобилног робота на бази машинског учења демонстрацијом и информација добијених од камере – *експериментални резултати*;
7. Репродукција жељене трајекторије и визуелно навођење интелигентног мобилног робота на бази биолошки инспирисаног алгоритма и хомографије – *теорија ројева и алгоритми оптимизације, одређивање глобалног оптимума нелинеарне функције применом алгоритма оптимизације колонијом свитаца, оригинални систем емпиријског управљања интелигентног мобилног робота*;
8. Закључак и правци будућих истраживања

# Закључак

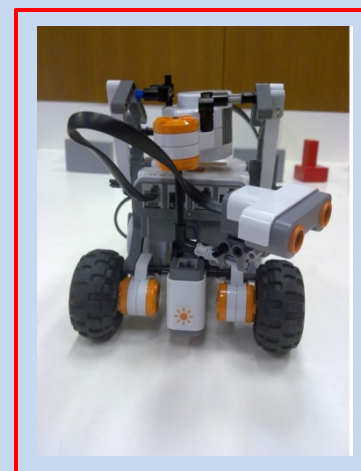
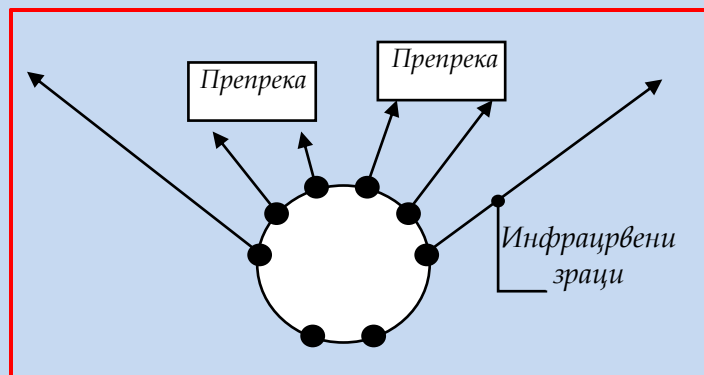
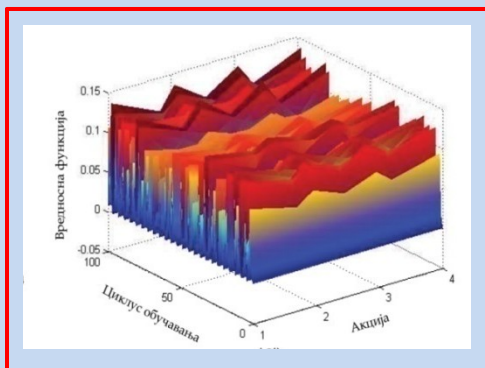
- Савремено схватање унутрашњег транспорта у оквиру ИТС подразумева примену мобилних робота и техника вештачке интелигенције



- Истраживања у оквиру докторске дисертације подразумевала су развој оригиналних управљачких система заснованих на прикупљању емпиријских података из окружења, њиховој класификацији и анализи кроз примену машинског учења, уз коришћење информација добијених од спољашњих сензора
- Укупно је развијено **пет** оригиналних алгоритама емпиријског управљања на бази различитих техника машинског учења

# Закључак

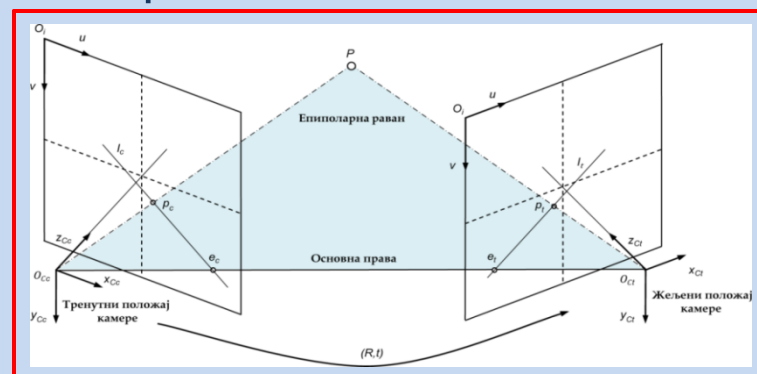
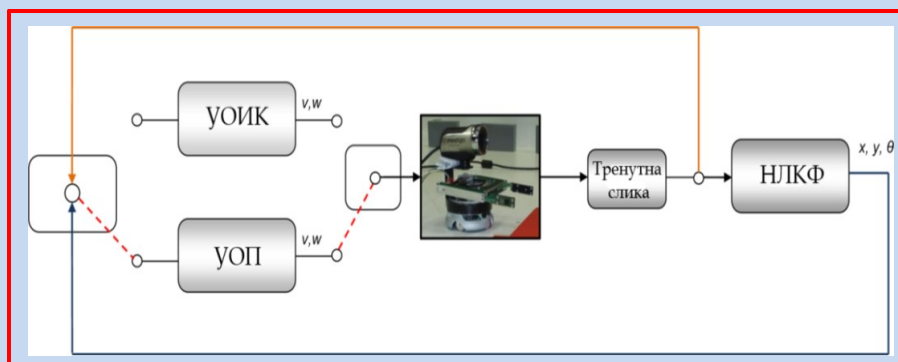
- Оригинални алгоритми емпиријског управљања базирани су на 9 различитих техника вештачке интелигенције
- Решени су проблеми навигације, избегавања препрека и локализације мобилног робота у лабораторијском моделу технолошког окружења
- Експериментална верификација новоразвијеног емпиријског управљачког система мобилног робота базирана је на оригиналној методи Q-учења





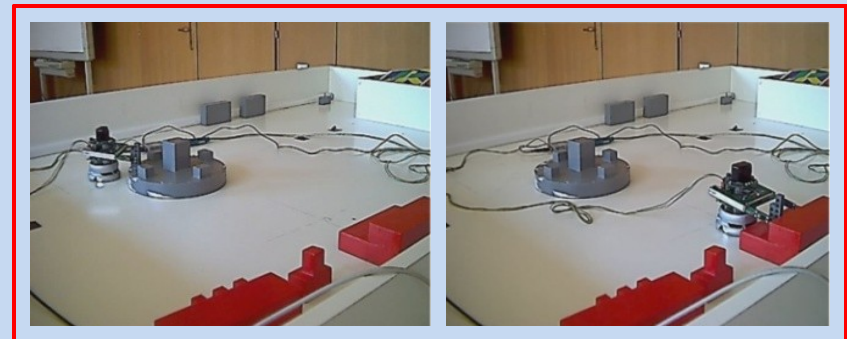
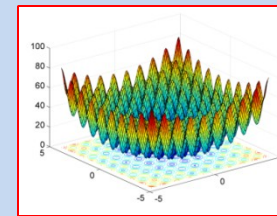
# Закључак

- Имплементирано је укупно 4 алгоритма управљања (IBVS, PBVS, EG, H) на основу информација добијених од камере
- Оригинално развијен алгоритам на бази епиполарне геометрије је тестиран за решавање проблема унутрашњег транспорта помоћу мобилног робота *Khepera II*, уз коришћење *WEB* камере и хватача *KheGrip*
- Развијен је и експериментално верификован нови алгоритам управљања (неуронско Q-учење и IBVS) на роботу *NeuroArm Manipulator System*, уз коришћење камере *CMUCam3*



# Закључак

- Развијен је емпиријски управљачки систем мобилног робота *Khepera II* применом машинског учења демонстрацијом (*LfD*) и вештачких неуронских мрежа
- Решена су два независна проблема управљања мобилног робота *Khepera II* у домену унутрашњег транспорта материјала: (i) репродукција жељене трајекторије до положаја дефинисаног у равни слике, и (ii) визуелно управљање на бази хомографије и машинског учења демонстрацијом



# Закључак

На основу развијених алгоритама емпиријског управљања робота закључује се да:

- **Мобилни робот** (интелигентни агент) не мора да поседује било коју *a priori* информацију о динамици објекта управљања, стању окружења у коме се налази и природи процеса у коме учествује;
- Имплементацијом вештачке неуронске мреже у управљачки систем базиран на **машинском учењу ојачавањем**, значајно је убрзана конвергенција алгоритама ка оптималном решењу;
- УОП и УОИК омогућавају: (i) раздвајање сложеног проблема на два једноставнија проблема, (ii) решење проблема видног поља камере у почетном положају мобилног робота (случај у коме **карактеристични објекти нису у видном пољу камере**);
- Дефинисањем жељених области карактеристичних објеката у равни слике, омогућено је **кретање робота оптималном путањом**;

# Закључак

- Остварени положај робота **једнозначно** указује на то да **робот врши кориговање свих положаја** у случају осцилације епипола у равни слике и наглих промена осветљења у окружењу;
- Резултати примене метахеуристичког алгоритма оптимизације и хомографије на мобилном роботу *Khepera II* (са камером *KheCMUCam* и хватачем *KheGrip*) у лабораторијском моделу технолошког окружења потврђују да **робот репродукује и прати оптималну путању у реалном времену (*online*)**;
- Сви новоразвијени емпиријски алгоритми управљања мобилног робота неизискују додатну транспортну инфраструктуру или вештачке маркере;
- Увођењем техника машинског учења у управљачки систем мобилног робота, **елиминисана је зависност прорачуна управљања од**: промене амбијенталног осветљења, перформанси алгоритма детекције карактеристичних објеката, параметара калибрационе матрице - резолуције, величине пискела и фокалне дужине камере, утицаја шума у процесу аквизиције сигнала, оцене положаја *3D* објекта у односу на координатни систем камере, прорачуна епипола и фундаменталне матрице, као и постојања равни хомографије у *3D* сцени.

# Правци будућих истраживања

- Имплементација *fuzzy* технике машинског учења у циљу апроксимације функције пара стање-акција
- Хибридизација *fuzzy* алгоритама и система вештачких неуронских мрежа у оквиру машинског учења демонстрацијом у циљу унапређења перформанси мобилног робота у реалном времену
- Поређење и упоредну анализу других метахеуристичких метода оптимизације (*ACO*, *PSO*, или *GA*) у домену задатака праћења путање и визуелног управљања мобилног робота
- Увођење других техника машинског учења у оквиру развијених емпиријских алгоритама управљања

# Хвала на пажњи!

