

АТ-4 Интелигентно управљање аутономним системима – алгоритам емпиријског управљања

Проф. др Зоран Миљковић

Интелигентно управљање аутономним роботом

- Познате методе управљања (нпр. адаптивно управљање), су примењене у системима машина алатки и робота;
- Карактерише висок ниво поремећаја, велики број подсистема, ретко успостављен експлицитан модел, вишедимензионалност простора одлучивања, дистрибуирани сензори, и др.
- Живи системи у природи имају способност да у сличним ситуацијама различитих неодређености и поремећаја реагују спонтано и адекватно => **интелигентно управљање**.

- 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**.
- Три категорије проблема: *Комплексност, Нелинеарности и Неодређеност* система.
- Развојем интелигентних управљачких система, на бази вештачких неуронских мрежа, могу се спрегнути адаптабилност, способност учења и препознавање узорака (решавање *неструктурисане неодређености мехатронског система-робота*).

Три основне структуре интелигентног управљања

- Илустрација проблема неодређености => примене индустријских робота који раде у тзв. инжењерски уређеном окружењу, када се акумулира мала, али стално присутна, грешка позиционирања у односу на објекат.
- У једном тренутку долази до прекорачења дозвољене границе грешке позиционирања, тако да се систем индустријског робота тада мора или подвргнути репрограмирању или инжењерски другачијем организовању;
- Заустављање или чак и редизајн линије или ћелије!

• Три основне структуре интелигентног управљања:

1. *Структура адаптивних перформанси* мотивисана је експертским управљањем од стране човека и/или когнитивним способностима човека; настоји да директно управља системом индустријског робота преко интелигентног управљачког система;

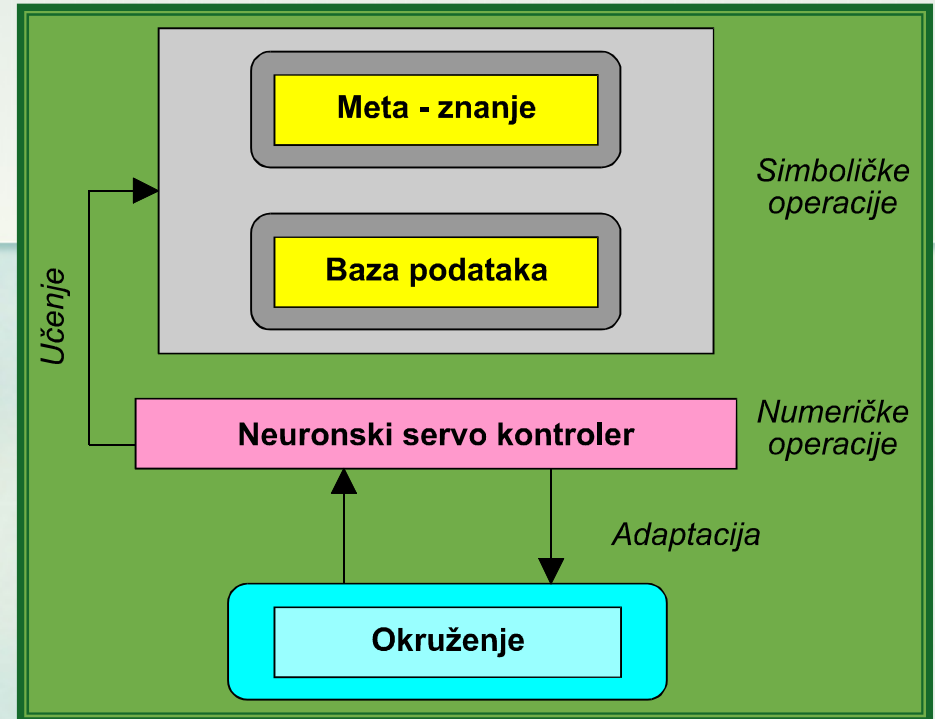
2. *Параметарско-адаптивна структура* интелигентна управљачка јединица ради као „*on-line* подешавач” конвенционалног контролера (најчешће PID-контролера) и

3. *Хијерархијска структура*, интелигентни управљачки систем је контролер високог нивоа, који настоји да модификује референтне улазе на подсистеме нижег нивоа.

Концепт хијерархијског интелигентног управљања

Пример: препознавање динамичког утицаја околине

- Неуронски Серво Контролер (Neural Servo Controller - NSC), развијен у Јапану почетком деведесетих година, намењен управљању на бази контактне силе;
- Вештачке неуронске мреже у оквиру NSC компензују нелинеарност и непознату динамику система аутономног робота и његовог окружења;
- Основни задатак оваквог вида управљања је везан за савладавање тешкоћа које се јављају при класификацији информација;
- Хијерархијско интелигентно управљање!



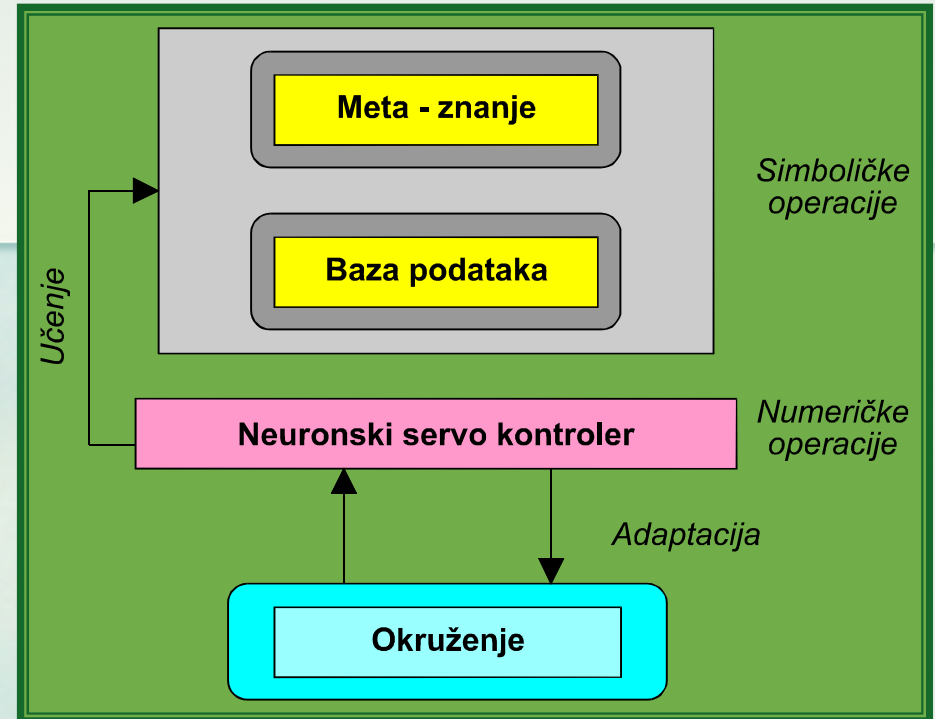
- Концепт почива на повратним спрегама, односно нивоима интелигентног управљања:

Ниво машинског учења и

Ниво адаптације.

Концепт хијерархијског интелигентног управљања

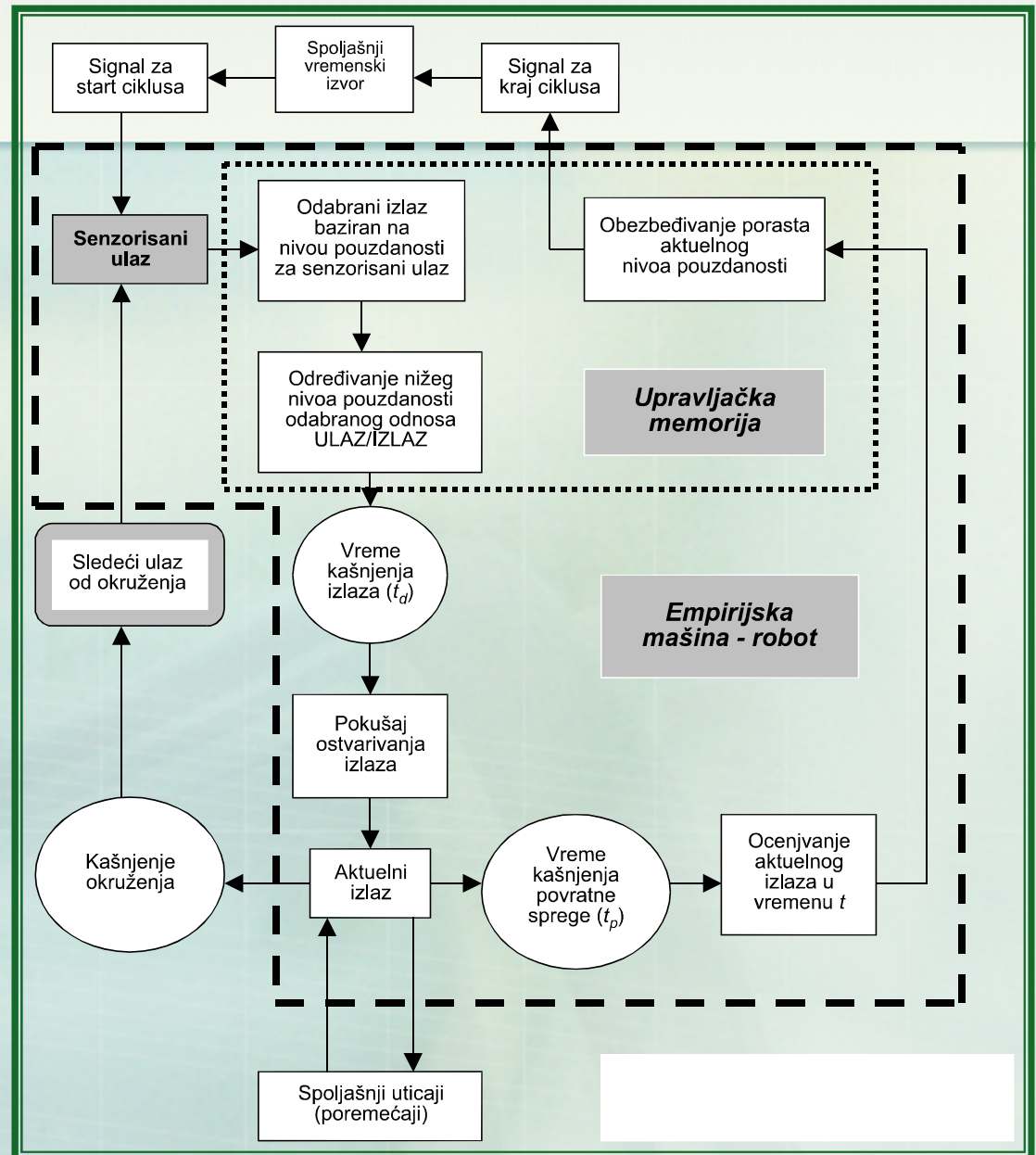
- *Ниво учења* има хијерархијску структуру: служи за препознавање у ширем смислу и планирање управљачке стратегије;
- *Ниво препознавања* користи вештачке неуронске мреже (као елементе дрвета одлучивања), са циљем трансформације различитих сензорских података, из нумеричких квантитета у симболичке квалитете, како би се остварила *сензорска фузија* и генерисало *мета-знање*.
- Сензори који се најчешће користе код аутономних робота су: камере-системи препознавања, тактилни, сензори сила и момената, и др.
- Могуће реализовати управљачку стратегију применом ВМ користе као универзални апроксиматори за серво контролер на нивоу *адаптације*.



- *Адаптацијом* се врши подешавање управљачког закона у односу на тренутни статус динамичког процеса у коме аутономни робот учествује;
- Нелинеарност и неодређеност могу да се реше помоћу вештачког неуронског система.

Емпиријска управљачка стратегија: **Алгоритам емпиријског управљања**

- Робот (емпиријска машина) памти претходне догађаје, оцењивањем проверава да ли су ти догађаји у складу са предикцијом;
- На основу добијених резултата, робот мења основну предикцију, како би у будућим догађајима могао да селекује највећу вероватноћу успешности у остваривању задатка;
- Важно: однос *СЕНЗОР* \Leftrightarrow *АКТУАТОР* мора да буде постојан!

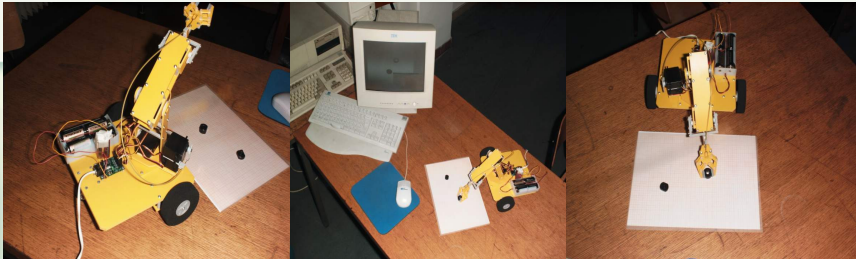


Емпиријска управљачка стратегија:

Алгоритам емпиријског управљања

- **Правило 1:** Емпиријски управљачки систем мора да селектује излаз (после очекиваног кашњења), уз највиши ниво поузданости, сагласно његовој меморији, за дати специфични улаз.
- **Правило 2:** Ако селектирани излаз може да се оствари, меморисани ниво поузданости тог излаза за дати улаз мора да буде у порасту, тако да вероватноћа каснијих успешних селектирања тог излаза за тај дати улаз има исти тренд раста.
- **Правило 3:** Ако селектирани излаз за специфични дати улаз не би могао да се оствари (јер је спречен, ограничен или томе слично од стране окружења, или од неког спољашњег утицаја попут утицаја „учитеља-тренера” приликом обучавања, или је до тога дошло под утицајем неких интерних сигнала, актуатора, односно сопствене структуре), ниво поузданости који је меморисан мора да буде сведен на нижи ниво тако да вероватноћа каснијих успешних селектирања тог излаза за тај дати улаз буде мања.
- **Правило 4:** Ако је остварен неки други нови излаз, меморисани ниво поузданости тог излаза за дати улаз мора да буде у порасту, тако да вероватноћа каснијих успешних селектирања тог излаза за тај дати улаз има исти тренд раста.

Експериментални систем аутономног робота



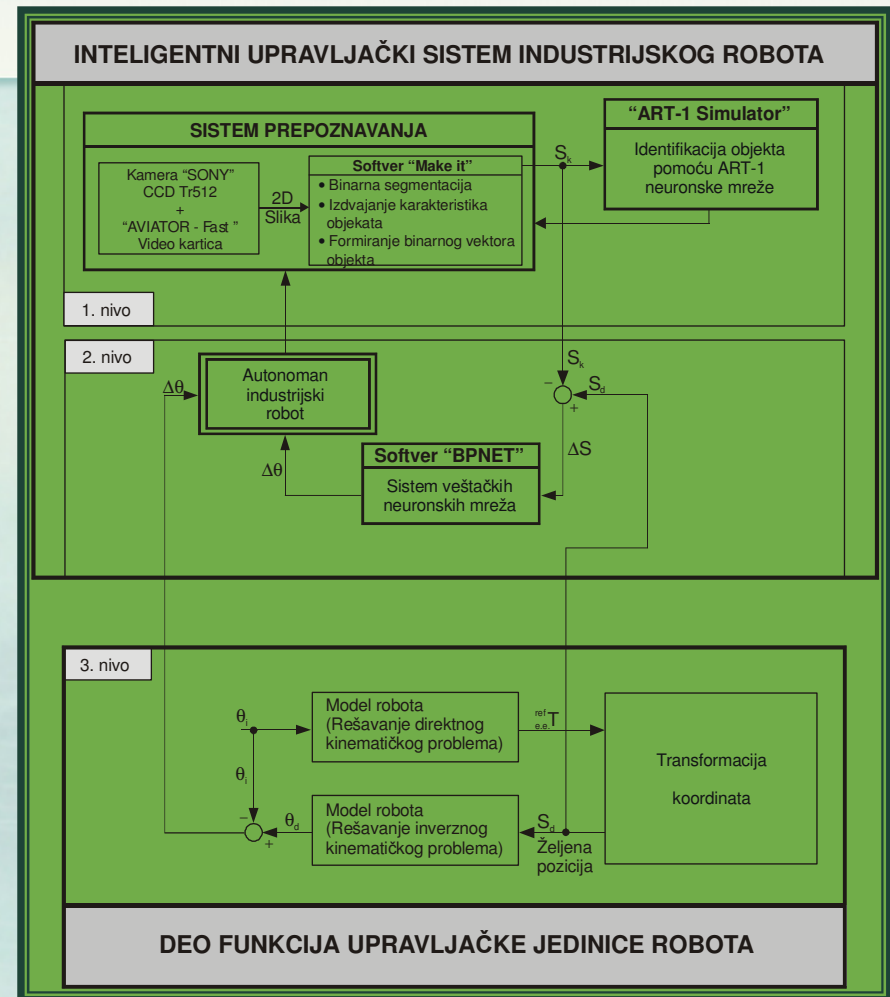
AMP „Дон Кихот”

- Предложени систем хијерархијског интелигентног управљања, остварује кретање аутономног робота тако да он може да приступи објекту из произвољног почетног положаја, уз одговарајуће позиционирање и оријентацију енд-ефектора.
- Релације између података о објекту добијених од система препознавања и углова ротације у зглобовима робота су нелинеарне.

- Развијени интелигентни управљачки систем се организује самостално при решавању те нелинеарности, тако што користи способности вештачких неуронских мрежа, за које се зна да су у стању да превазиђу проблем нелинеарних корелација применом познатих алгоритама учења;
- Овакав хијерархијски интелигентни управљачки систем директно интегрише визуелне информације у серво-управљање роботом;
- Концепт управљачке стратегије се заправо односи на проблем препознавања и манипулације препознатих објеката;
- Камера може да буде постављена изнад објеката или може да се налази на енд-ефектору робота (оптичка оса камере поклапа са z-осом локалног координатног система који је везан за врх (TCP-“tool center point”) робота).

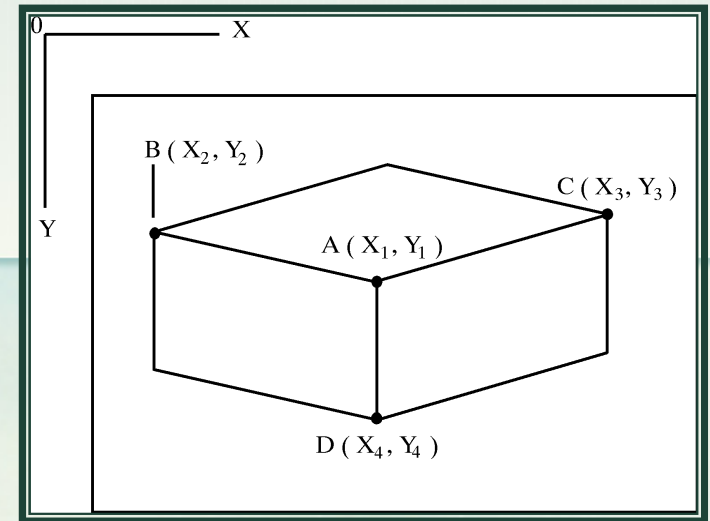
Експериментални систем аутономног робота

- Након анализе слике и издвајања карактеристика објекта врши се идентификација објекта коришћењем ART-1 неуронске мреже ("Adaptive Resonance Theory") на првом нивоу, а затим се систем ВР неуронских мрежа ("backpropagation") примењује за нелинеарна пресликавања ОБЈЕКАТ \Rightarrow енд-ефектор РОБОТА на другом нивоу;
- У току машинског учења робота користи се део функција постојеће управљачке јединице (трећи ниво), како би се кроз обучавање робота одредиле неопходне унутрашње координате (углови ротације θ_i у зглобовима) за успешно позиционирање и оријентацију енд-ефектора робота релативно у односу на препознати и идентификовани објекат.



Хијерархијско интелигентно управљање аутономним роботом

- Управљачка стратегија је базирана на визуелним информацијама о објекту коме робот треба да приступи;
- Подразумева генерисање промена углова ротације у зглобовима робота како би се позиција и оријентација његовог енд-ефектора довела у одговарајућу корелацију са тренутним положајем објекта;
- Одступање $\Delta \mathbf{S}$ представља промене координата. Ако је $\Delta \mathbf{S}$ познато онда је могуће одредити и промене углова ротације у зглобовима робота $\Delta \theta$, коришћењем система вештачких неуронских мрежа уместо нелинеарних трансформација које зависе од углова ротације θ_i ;
- Улаз у ВР неуронску мрежу чини скуп који је, за пример призме снимљене камером, представљен вектором $\Delta \mathbf{S}$ за позиције четири карактеристична темена у домену показане 2D слике и тренутним угловима ротације θ_i у зглобовима робота.



- Излаз неуронске мреже представљен је вектором промене унутрашњих координата $\Delta \theta$:

$$\Delta \theta = NM (\Delta \mathbf{S}, \theta)$$

NM - неуронска мрежа.

Учење нелинеарних релација између углова ротације у зглобовима робота и визуелних информација о објекту - процедура

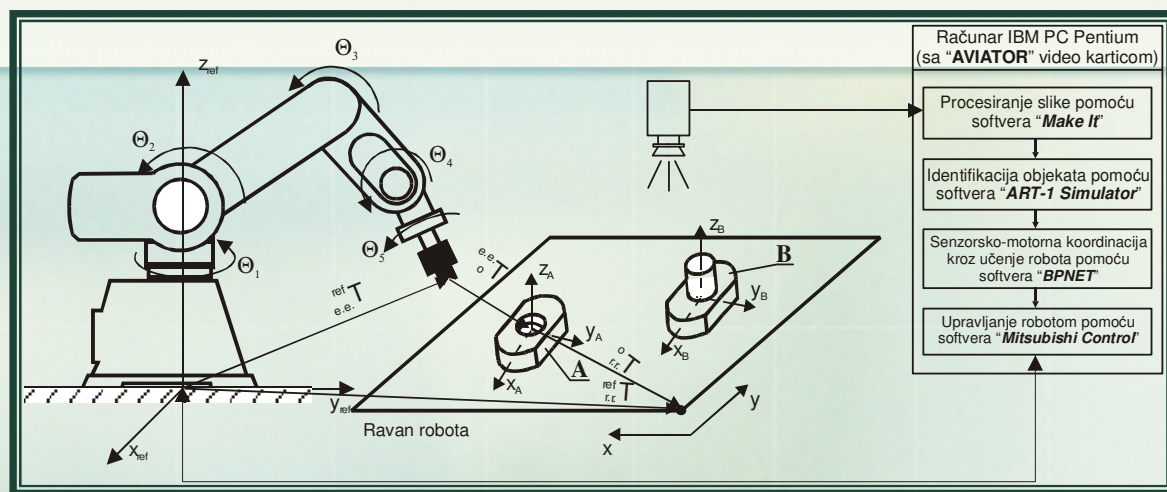
1. Прво се, кретањем робота, он доведе у захтевану позицију и оријентацију енд-ефектора (хватача) у односу на објекат, у овом случају у односу на призму, која се тада сними камером;
2. У том случају су $\Delta \mathbf{S}$ и $\Delta \theta$ једнаке нули, јер су енд-ефектор робота и објекат у захтеваном међусобном односу;
3. За случајно изабране вредности промене углова ротације у зглобовима робота $\Delta \theta$ и сходно томе померања енд-ефектора на коме може да се налази камера, утврђују се промене координата $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ карактеристичних темена 2D слике призме за тренутну слику у односу на претходну, захтевану;
4. Тренутни углови ротације у зглобовима робота θ_i , посматрано у односу на иницијално стање, се могу утврдити на основу унутрашњих мерних елемената и основног управљачког система;
5. Процес машинског учења подразумева претходно утврђивање већег броја могућих положаја (позиција и оријентација) призме помоћу карактеристичних темена, као и одређивање углова ротације θ_i у зглобовима робота, односно промене тих углова $\Delta \theta$ за утврђене положаје призме.

Предности конципиране управљачке стратегије

- Посебно изражена код робота вертикалне зглобне конфигурације;
- Унутрашње координате одређују релативно померање сегмената робота, а њихов вектор дат преко $\mathbf{q}_i = [q_1(t), \dots, q_n(t)]^T$ дефинише простор унутрашњих координата ($\mathbf{q}_i = \theta_i$ за ротационе зглобове, односно $\mathbf{q}_i = \mathbf{d}_i$ за транслаторне);
- Спољашње координате су дате преко вектора $\mathbf{X}_e = [X, Y, Z, \Phi, \Theta, \Psi]^T$, који је најчешће дефинисан коришћењем свих шест координата;
- Променом унутрашњих координата \mathbf{q}_i мењају се спољашње координате, те је $\mathbf{X}_e = f(\mathbf{q}_i)$ заправо директни кинематички проблем, јер се за задато \mathbf{q}_i одређује позиција и оријентација енд-ефектора робота. Много комплекснији и много чешћи проблем се односи на то да, за задате спољашње координате, односно позицију и оријентацију енд-ефектора робота, треба да се одреде унутрашње координате, односно помераји у зглобовима
- $\mathbf{q}_i = f^{-1}(\mathbf{X}_e)$ представља инверзни кинематички проблем;
- Примењена стратегија омогућава успешно савладавање нелинеарности.

Експериментални систем робота "MITSUBISHI Movemaster-EX"

- Фиксно постављена камера снима објекте и генериш 2D слику;
- Софтвер "Make it" после процесирања 2D слике (коришћењем сегментације преко региона) издваја карактеристике објеката и формира бинарни вектор којим се представља препознати објекат;
- Идентификација објеката применом развијеног софтвера "ART-1 Simulator" (идентификује објекат коме робот треба да приступи);



- Након идентификације објекта, применом софтвера "BPnet", као и софтвера "MITSUBISHI Control" за надзор и управљање едукационим индустријским роботом "MITSUBISHI Movemaster-EX", реализује се сензорско-моторна координација енд-ефектора робота при манипулацији објекта;
- Смањен број хомогених трансформација

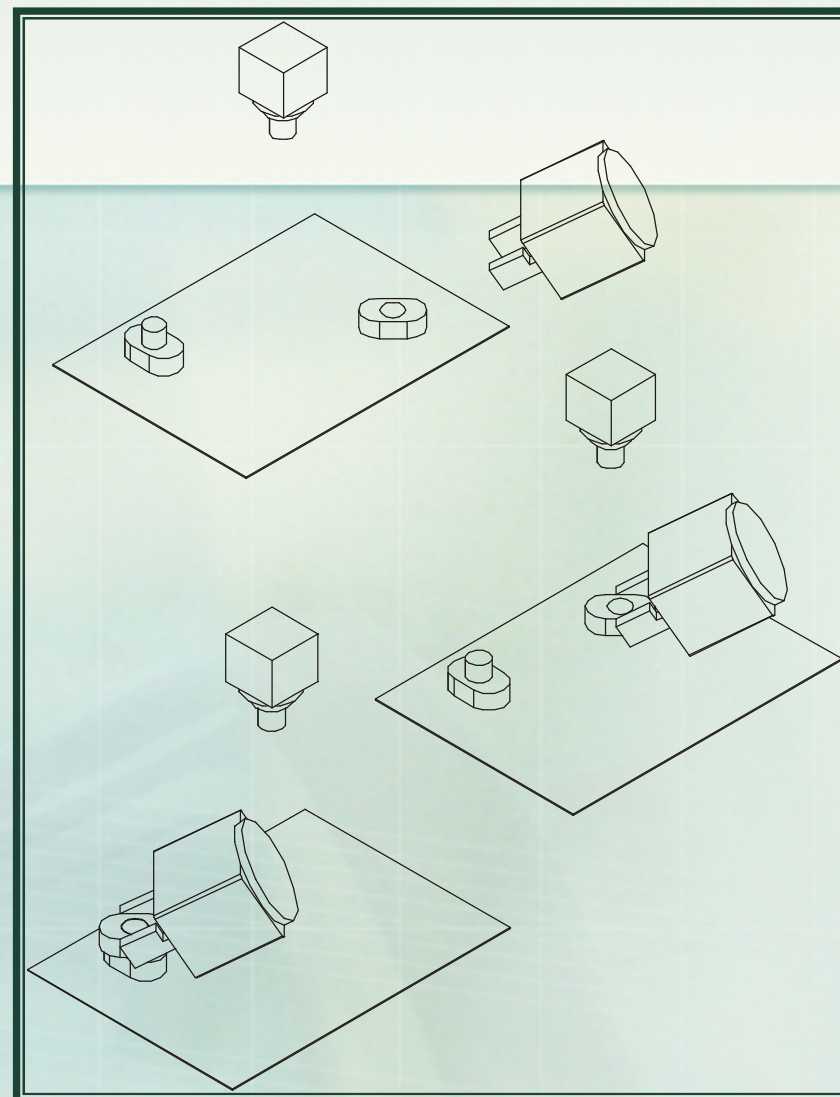
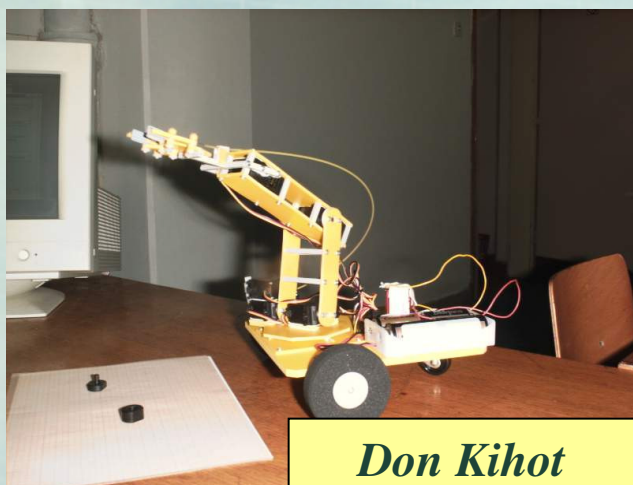
Основне информације

- Рачунар - примарна процесирајућа компонента експерименталног система;
- "AVIATOR" - картица искоришћена за прикупљање свих визуелних информација о снимљеним објектима које долазе од камере, а користе се за процесирање слике;
- "SONY" CCD TR512E камера је пасивна компонента експерименталног система;
- Слика се после дигитализације меморисала у фајлу, у меморији IBM PC *Pentium* рачунара (за слику снимљених објеката А и В, са резолуцијом од 640×480, треба око 300 *Kbyte* меморије) и затим се коришћењем софтвера "Make it" реализовало њено процесирање и анализа;
- Серијски интерфејс RS-232C је употребљен за комуникацију са роботом;
- Многе комплексне управљачке функције робота "MITSUBISHI Movemaster-EX" нису биле неопходне за остваривање новог концепта хијерархијског интелигентног управљања => „Дон Кихот”.

ПРИМЕРИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО РАЗВИЈЕНИХ ИНТЕЛИГЕНТНИХ УПРАВЉАЧКИХ СИСТЕМА

- При реализацији спроведених истраживања, **захтев за аутономношћу индустријског робота је представљао полазиште при постављању хипотезе** о томе да је, на основу информација од сензора-камере и учења на бази вештачких неуронских мрежа, могуће успешно реализовати препознавање објекта, а затим и технолошки задатак манипулације;
- Типична примена индустријских робота - технолошке задатке манипулације објектима, тзв. *"pick and place"* технолошке задатке и задатке монтаже:
 1. Приступање препознатом објекту,
 2. Хватање објекта, уз одговарајућу оријентацију прстију хватача робота,
 3. Премештање објекта на другу локацију и спајање са другим објектом.

Технолошки задатак манипулације објектима - "pick and place"



Интелигентно управљање роботом „Дон Кихот”

- Реализован софтвер за надзор и управљање роботом;
- Софтвер има уграђено решење директног и инверзног кинематичког проблема;
- Кориснику доступне информације о оствареној позицији и оријентацији врха робота;
- Визуелни приказ остварених углова ротације у сваком зглобу.

Direktni Kinematski problem

Zadate vrednosti uglova

θ1	Ugao rotacije u bazi	0	135	<input type="checkbox"/>	1
θ2	Ugao rotacije u ramenu	0	101	<input type="checkbox"/>	1
θ3	Uao rotacije laktā	0	89	<input type="checkbox"/>	1
θ4	Ugao rotacije sake	0	109	<input type="checkbox"/>	1
θ5	Ugao za D/Z EE-a	0	126	<input type="checkbox"/>	1

Pokretna platforma

<input type="checkbox"/>	1
<input type="checkbox"/>	1

Matrica pozicije i orijentacije EE-a robota

1	0	0	208.999999
0	1	0	0
0	0	1	170
0	0	0	1

Učitaj položaje Snimi položaje Zapamti položaj Povratak

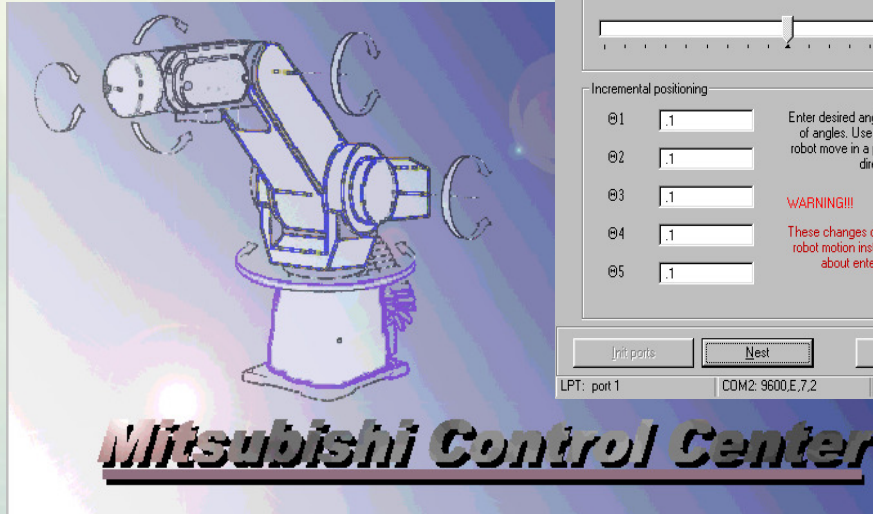
Home pozicija Pokreni Play it again!

Broj zapamčenih položaja

Direktni Kinematski problem

Start Zoran Lynx arm direct control - v.... Direktni Kinematski ... En 2:50 PM

Интелигентно управљање роботом „Дон Кихот”



- Софтвер за управљање роботом "MITSUBISHI Movemaster-EX", чији су основни прозори дати на слици у наставку;
- Решен директни кинематички проблем;
- Углови ротације у зглобовима се задају тако да је могуће апсолутно или инкрементално померање сваког покретног сегмента (инкремент 0.10);
- Остварене позиције и оријентације енд-ефектора су дефинисане резултатима добијеним после учења ВР неуронске мреже.

Експериментални резултати - „Дон Кихот”

	Објекат А								Објекат В							
	Жељене вредности				Финалне вредности				Жељене вредности				Финалне вредности			
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
1	-11	-18	13	-20	-11	<u>-17.5</u>	13	<u>-19</u>	12.5	-22.5	3	-19	<u>13</u>	<u>-23</u>	3	<u>-18.5</u>
2	-9	-17	14	-20	<u>-8.5</u>	-17	14	<u>-19.5</u>	14	-21	7.5	-15	<u>13</u>	-21	17.5	<u>-15.5</u>
3	-2	-17	12.5	-19.5	<u>-3</u>	<u>-17.5</u>	<u>13</u>	-19.5	10	-23	3.5	-16.5	<u>10.5</u>	<u>-22.5</u>	<u>2.5</u>	-16.5
...																
18	-10	-23.5	11.5	-4.5	-10	-23.5	<u>12</u>	-4.5	0	-11	16	-20	<u>-0.5</u>	<u>-10.5</u>	<u>16.5</u>	-20
19	-13.5	-23	13	-3.5	<u>-13</u>	-23	<u>12.5</u>	<u>-4</u>	-6	-7	20	-19	-6	<u>-8</u>	20	-19

• Жељене и финалне вредности углова у зглобовима.

	Објекат А			Објекат В	
	X_x	Y_x	θ	X_x	Y_x
1	43	94	12.5	21.6	56
2	45	56	-5	52.5	109
3	44	72	0	57.9	106.9

	Објекат А								Објекат В							
	Жељене вредности				Финалне вредности				Жељене вредности				Финалне вредности			
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
1	6	-18	15	-10.5	7	-21.5	10.5	-15	-6	-7	20	-19	-6	-8.5	20	-19
2	-5.5	-19.5	13	-10.5	-7	-23	12.5	-7	10	-23	3.5	-16.5	10.5	-23.5	2.5	-16.5
3	0	-19.5	13	-10.5	-1.5	-23.5	8	-14	9.5	-25	0	-16	9	-24.5	1	-16

• Жељене и финалне вредности углова (тест положаји).

- Две четворослојне ВР вештачке неуронске мреже ($3 \times 10 \times 10 \times 4$ за објекат А и $2 \times 10 \times 10 \times 4$ за објекат В);
- Тачност при оцењивању добијених резултата била је 99.6% (максимално одступање до 5° , $\eta=0.2$, 20 000 итерација);
- За необучене парове грешка је 5.5 %.

Експериментални резултати - „Дон Кихот”

Табела 5.

		ОБЈЕКАТ А					ОБЈЕКАТ В				
		Жељене вредности углова ротације					Финалне вредности углова ротације				
		θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5
1	Обучени	-7.1	55	-82	24	94	-7.6	55.5	-82	24.7	95
2		-6.3	59	-88	26	54	-6.4	59	-89	27	55
9		4	41	-53	10	74	4.2	40.5	-52	9	73
12	Необучени	4	47	-65	12	90	1.3	46	-62	13.7	85.2
13		-4	44	-60	13	80	-4	45.2	-61	13.5	78.6
19		-5	49	-68	18	88	-5.5	48.2	-67	17	89

Табела 6.

		ОБЈЕКАТ А					ОБЈЕКАТ В				
		Жељене вредности углова ротације					Финалне вредности углова ротације				
		θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5
2	Обучени	13	49	-68	16	95	13.7	48.7	-67	15	96
5		-5	49	-68	18	82	-4.8	48.5	-67	17	81.5
7		-4	44	-95	28	80	-3	44.5	-96	29.1	80
12	Необучени	-5	64	-99	32	76	-4.5	63.3	-97	30.6	80.2
13		13	49	-68	16	122	13.3	48.5	67.5	15	119
19		11	41	-52	6	94	11	41	-53	8	91.6

Табела 7.

		ОБЈЕКАТ А			ОБЈЕКАТ В	
		X_x	Y_x	θ	X_x	Y_x
1 (2)	Обучени	113	92	-15.9	219.3	67.1
2 (5)		117.3	108.3	25	131.3	48.8
9 (7)		170	22.5	15.1	136.8	138.1
12	Необучени	169	56	-2.3	128.7	118.5
13		136	38	0	220	67
19		131	51	-10	206	34

- Две четворослојне ВР вештачке неуронске мреже ($3 \times 10 \times 10 \times 5$ за објекат А и $2 \times 10 \times 10 \times 5$ за објекат В);

- После 28 000 итерација ВР вештачка неуронска мрежа је остварила минималну грешку (параметар учења се такође није мењао и имао је вредност $\eta=0.2$), уз тачност при оцењивању добијених резултата од 99.6 %;
- Максимално одступање је 1° за обучене парове узорака;
- Максимално одступање за необучене парове узорака (положај објекта промењен) је до 5° .

Хвала на пажњи!

Питања?