

МЕТОДЕ ОДЛУЧИВАЊА

АТ-9 Развој производних технологија за 21. век

ЕМПИРИЈСКО УПРАВЉАЊЕ

Интелигентно управљање аутономним роботом

Опште познате методе управљања, попут адаптивног управљања, су примењене у многим комплексним системима машина алатки и робота, при чему треба нагласити да их карактерише висок ниво поремећаја, велики број подсистема, ретко успостављен експлицитан модел, вишедимензионалност простора одлучивања, дистрибуирани сензори, и др. Како живи системи у природи имају способност да у сличним ситуацијама различитих неодређености и поремећаја реагују спонтано и адекватно, многи теоретичари су настојали да уграде те способности у мехатронске системе попут робота нове генерације. Тако су последњих пар деценија развијане области препознавања узорака, машинског учења и самоорганизовања, да би се та спирала развоја данас оријентисала ка новој научној области познатој под називом **интелигентно управљање**. Квалитативно посматрано, *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.*

Тешкоће које прате овакав вид управљања комплексним системима могу се, у ширем разматрању, сврстати у три категорије. Прва је везана за *комплексност*, друга се односи на појаву *нелинеарности* и трећа је *неодређеност* система. У току последњих петнаест година је показано да су вештачке неуронске мреже веома употребљиве у функцији превазилажења ових тешкоћа. Како се развојем интелигентних управљачких система, на бази вештачких неуронских мрежа, могу спрегнути адаптабилност, способност учења и препознавање узорака, то је на тај начин могуће и доносити одлуке на различитим нивоима апстракције, у функцији решавања неструктурисане неодређености мехатронског система-робота.

Ради илустрације проблема које доносе те неодређености, довољно је само напоменути сасвим реалну ситуацију примене индустријских робота који раде у тзв. инжењерски уређеном окружењу, када се акумулира мала, али стално присутна, грешка позиционирања у односу на објекат. Наиме, 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. Оба поступка превазилажења тог озбиљног проблема везаног за успешан рад роботизоване ћелије или линије, представља радикалну интервенцију која подразумева заустављање рада индустријског робота, дакле нове трошкове, посматрано кроз више аспеката, а понекад и редизајн читаве технолошке ћелије или линије.

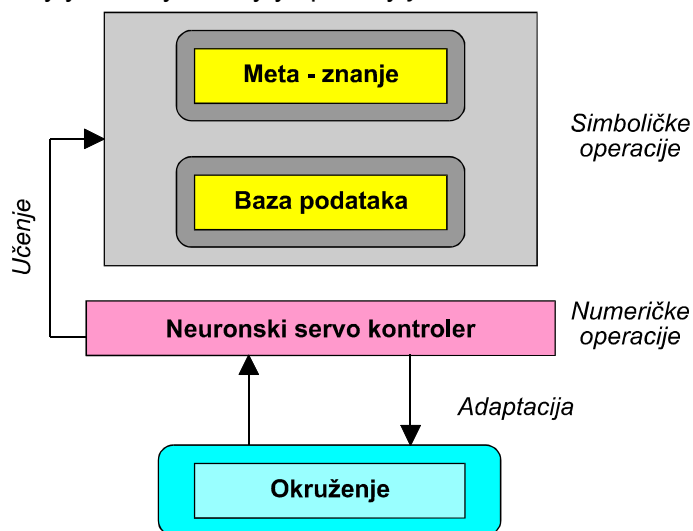
Интелигентно управљање аутономним роботом обезбеђује захтеване перформансе везане за остваривање постављеног циља, кроз претраживање сопствене базе знања. Постоје три основне структуре интелигентног управљања: *структура адаптивних перформанси*, *параметарско-адаптивна структура* и *хијерархијска структура*. Структура адаптивних перформанси мотивисана је експертским управљањем од стране човека и/или когнитивним способностима човека, при чему она настоји да директно управља системом индустријског робота преко интелигентног управљачког система. Са друге стране, код параметарско-адаптивне структуре, интелигентна управљачка јединица ради као „*on-line подешавач*” конвенционалног контролера (најчешће PID-контролера). Код хијерархијске структуре, интелигентни управљачки систем је контролер високог нивоа, који настоји да само модификује референтне улазе на подсистеме нижег нивоа. Ти подсистеми нижег нивоа могу бити серво-управљачки системи, чија интерна структура и параметри нису нарушени надградњом која је остварена развојем и коришћењем интелигентног управљачког система. Грешка и/или инкремент грешке излаза система и квалитет предузетих корака за њено превазилажење су заједнички коришћени у функцији процене перформанси система.

Дакле, аутономни роботи морају да буду у стању да, поред сопствене динамике, препознају и динамичке утицаје околине, како би се остварили позитивни ефекти у једном неодређеном реалном окружењу. Тако је у Јапану, почетком деведесетих година XX века, развијен Неуронски Серво Контролер (Neural Servo Controller - NSC), намењен управљању на бази контактне силе, с обзиром да вештачке неуронске мреже у оквиру NSC могу да компензују нелинеарност и непознату динамику система аутономног робота и његовог окружења. Концепт једног таквог хијерархијског интелигентног управљања је приказан на слици у наставку. Основни задатак оваквог вида управљања је везан за савладавање тешкоћа које се јављају при класификацији информација, како би се нумерички подаци

добијени од сензора пресликали у симболичке податке, на основу којих аутономни робот може да „разуме“ стање процеса у коме учествује.

Види се да овај концепт почива на повратним спрегама, односно нивоима интелигентног управљања: *нивоу машинског учења* и *нивоу адаптације*. Ниво учења има хијерархијску структуру: препознавање у ширем смислу тог појма и планирање управљачке стратегије. Ниво препознавања користи вештачке неуронске мреже као елементе дрвета одлучивања, са циљем да оне изврше трансформацију различитих сензорских података – информација, из нумеричких квантитета у симболичке квалитете, како би се остварила *сензорска фузија* и генерисало *мета-знање*. Сензори који се, на овај начин, најчешће користе код аутономних робота су: камере-системи препознавања, тактилни, сензори сила и момената, и др. Иначе, на нивоу планирања, расуђивање се одвија преко симболичких података у функцији генерисања стратешких планова везаних за задатак робота, трајекторију, силу и остала планирања. Дакле, на нивоу учења може да се расуђује на основу непознате чињенице и сензорске информације која је преузета. Затим је могуће реализовати управљачку стратегију тако што се вештачке неуронске мреже користе као универзални апроксиматори за серво контролер, и то на нивоу *адаптације* у зависности од стања процеса управљања. Такође, на нивоу машинског учења може да се изврши вредновање нивоа *адаптације* коришћењем стеченог знања.

Са друге стране, *адаптацијом* се врши усклађивање-подешавање управљачког закона с обзиром на тренутни статус динамичког процеса у коме аутономни робот учествује. Посебно треба нагласити да нелинеарност, његова компензација и неодређеност која је укључена у окружење, може да се реши помоћу вештачког неуронског система и зато у процесу *адаптације* неуронске мреже имају значајнију оперативну улогу у односу на ону у процесу учења.



Концепт хијерархијског интелигентног управљања

Евидентно је да су аутономни индустријски роботи, који „разумеју“ технолошки задатак и околину, саставни 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 алгоритма учења заснованих на емпиријском управљању. Предвиђања компетентних истраживачких центара у Јапану (*Nagoya University*), Европи (*Swiss Federal Institute of Technology*) и САД (*MIT*) указују на то да ће у првој деценији 21. века бити успостављен концепт интелигентних индустријских робота, који имају остварену способност расуђивања, односно машинског учења, и то на бази развоја *алгоритма емпиријског управљања*, при чему се у том контексту посебно истиче значајнија *аутономност* робота, као кључна особина која се остварује кроз нове **емпиријске управљачке стратегије**.

Аутономни системи се одликују способношћу да успешно раде у неструктурисаном радном окружењу, које има одговарајући степен неодређености. Наиме, савремени производни системи подразумевају учешће аутономних индустријских робота и машина алатки, који извршавају технолошке задатке у интерактивном и кооперативном раду, како би се у инжењерски недовољно одређеном окружењу успешно реализовао технолошки задатак. Код аутономних индустријских робота последње генерације успостављена је емпиријска управљачка стратегија (у истраживачким лабораторијама) која у многоме подсећа на поступке човека у реализацији свакодневних активности. Активности човека у обављању редовних послова подразумевају прилажење, хватање и премештање објеката, уз учешће чула вида, моторичких и менталних способности. При томе човек

не решава сложене математичко-механичке проблеме (нпр. инверзни кинематички проблем). Практично, очи човека „наводе“ руку ка објекту, а захваљујући претходно наученој моторичкој вештини извршава се коректно хватање и манипулација објекта. Идеја која је развијена у спроведеним истраживањима (З.Миљковић-књига) базирана је на аналогији са описаном човековом активношћу. Она подразумева да се, применом интелигентног управљања роботом, реализује аналогија са „биолошким хардвером“ човека, код кога се системски генеришу унутрашње координате у функцији решавања задатка (манипулација, паковање, спајање, итд.). На основу ове идеје је постављен научни циљ да се, у интеракцији мехатронских подсистема (машинства, електронике, информационах технологија), развије емпиријска управљачка стратегија хијерархијског интелигентног управљања аутономним индустријским роботима на бази система препознавања и учења, која је намењена производним технологијама 21. века. Да би се то остварило било је потребно унапредити управљачке алгоритме, а и искористити и иновирати познате принципе система препознавања код робота нове генерације, применом вештачке интелигенције. У наставку је дат *алгоритам емпиријског управљања* који, у складу са потребом да се реализује аутономно понашање индустријског робота, представља кључ за успостављање емпиријске управљачке стратегије.

Истраживања су реализована на *Катедри за производно машинство*, у оквиру *Лабораторије за индустријску роботiku и вештачку интелигенцију*, а добијени резултати су у директној вези са постављеним смерницама вишегодишњег развоја *Центра за Нове Технологије (CeNT)*, као стратешке научно-истраживачке базе Универзитета у Београду. Ти научно-истраживачки резултати обухватају и реализацију већег броја софтверских подсистема експерименталног карактера, а представљају конкретне излазе *CeNT* -а. Софтверски подсистеми који се овде посебно издвајају су: *“ART-1 Simulator”*, базиран на ART-1 вештачкој неуронској мрежи, као и *“BPnet”*, који се заснива на *“backpropagation”* вештачкој неуронској мрежи. Поред ових кључних софтверских подсистема, реализована су још три: *“Make it”*, за процесирање и анализу 2D слике објеката применом бинарне сегментације, као и два софтвера за надзор и управљање роботима *“MITSUBISHI Movemaster-EX”* и *„Дон Кухом”*. Сви ови софтвери су реализовани за *Windows®* оперативни систем и инсталирани су на IBM PC *Pentium* рачунарској платформи у *CeNT*-у. Оно што обједињује све ове хардверско-софтверске подсистеме је *алгоритам емпиријског управљања*.

Алгоритам емпиријског управљања

Да би у датом реалном окружењу аутономни индустријски робот био у стању да успешно оствари технолошки задатак, он мора да препозна промене и поремећаје у својој радној околини, како би реализовао аутономно понашање у складу са својим физичким ограничењима и способностима расуђивања, односно учења. Дакле, неопходно је да робот у својој управљачкој меморији, као емпиријска машина, памти претходне догађаје који су били засновани на одговарајућој предикцији, да оцењивањем (мерењем) проверава да ли су ти догађаји у складу са предикцијом и да на крају, на бази добијених резултата, буде у стању да мења основну предикцију, како би у будућим догађајима могао да селекује највећу вероватноћу успешности у остваривању технолошког задатка. Веома је битно нагласити да, ако је оствариво да однос *СЕНЗОР* \leftrightarrow *АКТУАТОР* буде постојан, емпиријски управљачки систем робота ће, на основу предикције, обезбедити одржавање постојаности тог односа, како би после већег броја покушаја емпиријска машина-робот постала интелигентна, вешта и опрезна приликом реализације повољних прилика за аутономно понашање у сопственом реалном окружењу.

Полази се од четири општа правила емпиријског алгоритма:

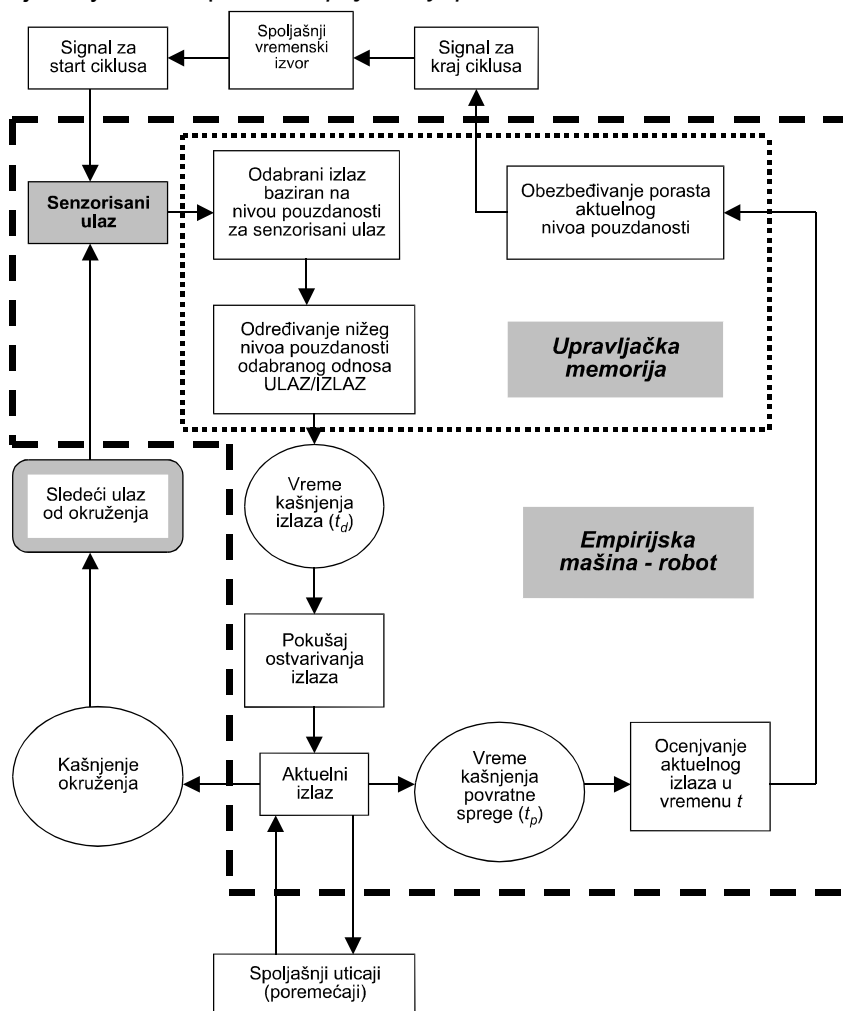
Правило 1: Емпиријски управљачки систем мора да селекује излаз (после очекиваног кашњења), уз највиши ниво поузданости, сагласно његовој меморији, за дати специфични улаз.

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.

Процес тестирања и поређења, као и захтеви које намеће аутономни индустријски робот базирани су на правилима емпиријског алгоритма, а обједињени су у *алгоритму емпиријског управљања*, који је приказан преко блок-дијаграма датог на слици доле. Овај блок-дијаграм издваја догађаје од значаја за успешан рад *емпиријског управљачког система*.



Блок-дијаграм алгоритма емпиријског управљања

У оквиру приказаног блок-дијаграма, најбоље место за почетак објашњавања *алгоритма емпиријског управљања* је блок *сензорисаног улаза*. Наиме, неко специфично улазно стање је тим блоком представљено на самом почетку прелазног циклусног периода. У блоку који прима то улазно стање емпиријски управљачки систем одређује одабрани излаз базиран на нивоу поузданости који он остварује за сва могућа излазна стања према доведеном улазу, при чему се снижава ниво поузданости одабраног односа УЛАЗ/ИЗЛАЗ. После очекиваног времена кашњења (t_d), емпиријски управљачки систем покушава да оствари излазно стање. Затим је могуће да се, због долажења актуатора робота у одговарајућу позицију, захтева додатно време. Тако, после још једног временског кашњења (t_p), емпиријски управљачки систем оцењује (мери) актуелно излазно стање и обезбеђује пораст нивоа поузданости оцењеног излазног стања за дато улазно стање у том прелазном циклусном периоду. Окружење и/или остали утицаји могу, и не морају, да утичу на остваривање одговарајућег излазног стања у току периода реализације технолошког задатка аутономног индустријског робота. Такође треба рећи да окружење и остали спољашњи утицаји успостављају *унутрашња (сопствена) кашњења* за време сваког прелазног циклусног периода и довођења следећег улазног стања у емпиријски управљачки систем (приказано блоком на слици горе). Циклуси се понављају до тренутка успостављања успешне реализације аутономног понашања индустријског робота приликом остваривања постављеног технолошког задатка.

Описани *алгоритам емпиријског управљања* базиран је на сличности са познатим *Hebb*-овим правилом које је уграђено у *паралелне дистрибуиране системе* попут вештачких неуронских мрежа.

Управо је због те сличности и развијена емпиријска управљачка стратегија хијерархијског интелигентног управљања аутономним роботима "MITSUBISHI Movemaster-EX" и „Дон Кихот“, која се ослања на примену вештачких неуронских мрежа.

У контексту претходног, тестирана је валидност описаног *алгоритма емпиријског управљања* на примеру посебно развијеног робота „Дон Кихот“, а на слици доле је показана реализација аутономног понашања у фазама. Емпиријска управљачка стратегија, базирана на приказаном *алгоритму емпиријског управљања*, показала је да, после машинског учења (коришћењем система вештачких неуронских мрежа), аутономни мобилни робот „Дон Кихот“ несметано прилази траженом објекту (објекту А или објекту В), што ће се видети у наставку.



Аутономно понашање антропоморфног мобилног робота „Дон Кихот“

Експериментални систем аутономног робота

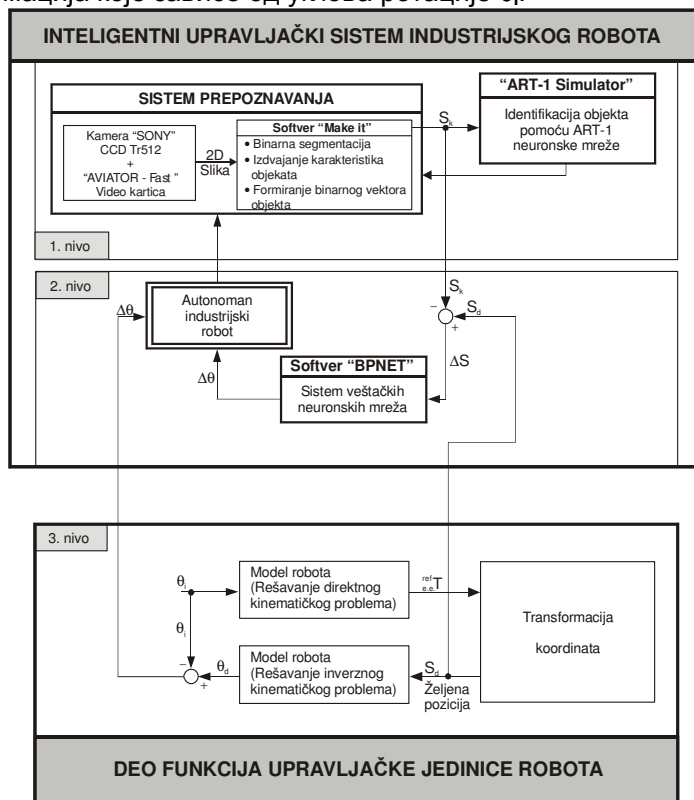
Управљачка стратегија аутономног робота са визуелним сензором-камером подразумева процесирање нумеричких података тако да се информације од система препознавања, уз машинско учење робота помоћу система вештачких неуронских мрежа, користе за остваривање жељеног позиционирања и оријентације енд-ефектора у односу на препознати и идентификовани објект-радни предмет. Позиција и оријентација објекта у односу на референтни координатни систем робота није позната, али је зато, кроз обучавање робота, позната жељена релативна позиција и оријентација енд-ефектора у односу на објекат. Предложени систем хијерархијског интелигентног управљања, остварује кретање аутономног робота тако да он може несметано да приступи објекту из произвољног иницијалног положаја, уз одговарајуће позиционирање и оријентацију енд-ефектора. Иначе, релације између података о објекту добијених од система препознавања и углова ротације у зглобовима робота вертикалне зглобне конфигурације, за жељено позиционирање и оријентацију енд-ефектора, су изразито нелинеарног карактера. 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 податке-информације у серво-управљање роботом.

Концепт управљачке стратегије се заправо односи на проблем препознавања и манипулације препознатих објеката, при чему је познато да су радни предмети потпуно геометријски одређени. Камера, која снима објекте, може да буде фиксно постављена изнад објеката или може да се налази на енд-ефектору робота. За камеру која је постављена на енд-ефектор робота, што је далеко повољнија ситуација (због могућности подешавања фокалног растојања и делимичног решавања проблема дисторзије слике), важи да се оптичка оса камере поклапа са z-осом локалног координатног система који је везан за врх (TCP-“tool center point”) робота.

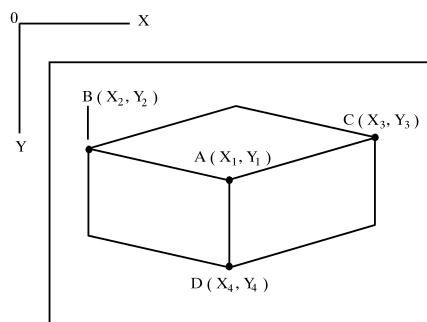
Развијени интелигентни управљачки систем подразумева да је покрет робота детерминисан коришћењем информација о објектима добијених од камере и система вештачких неуронских мрежа и заснива се на два процедурама које су приказане блок-дијаграмом на слици у наставку. Прва процедура подразумева коришћење дела функција постојеће управљачке јединице (нпр. "MITSUBISHI Movemaster-EX" робота), са надограђеним софтвером за рад у Windows® окружењу, а друга представља квалитативно виши ниво управљања јер користи интелигентно управљање базирано на систему вештачких неуронских мрежа. Хијерархијска структура интелигентног управљања роботом је организована тако да се у оквиру ове две процедуре могу уочити три хијерархијска нивоа (слика у наставку). Да би се боље разумела успостављена управљачка хијерархија, треба нагласити да се, после анализе слике објеката и издвајања њихових карактеристика, помоћу развијеног система препознавања, врши идентификација тих 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 ⇒ 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.

Ако се изврши анализа слике снимљених објеката, у погледу карактеристичних темена, уочава се да је могуће издвојити тачке са одговарајућим x -у координатама у равни слике, као што је урађено за једноставну 2D слику призме (слика доле). Наиме, управљачка стратегија је базирана на визуелним информацијама о објекту коме робот треба да приступи и подразумева генерисање таквих промена углова ротације у зглобовима робота како би се позиција и оријентација његовог енд-ефектора довела у одговарајућу корелацију са тренутним положајем објекта. Дакле, одступање ΔS (слика доле) представља промене координата нпр. Δx за карактеристична четири темена призме која је снимљена камером. Ако је ΔS познато (слика доле), 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 .



Блок-дијаграм хијерархијског интелигентног управљања аутономним роботом



Карактеристична темена 2D слике призме

Систем ВР вештачких неуронских мрежа је способан да учи непозната нелинеарна пресликавања скупа улазних облика узорака у скуп излазних. Улаз у ВР неуронску мрежу чини скуп који је, за пример призме снимљене камером, представљен вектором ΔS за позиције четири карактеристична темена у домену показане 2D слике и тренутним угловима ротације θ_i у зглобовима робота. Излаз неуронске мреже даје скуп захтеваних углова ротације у зглобовима робота, који је представљен вектором промене тих унутрашњих координата $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = NM(\Delta S, \theta)$$

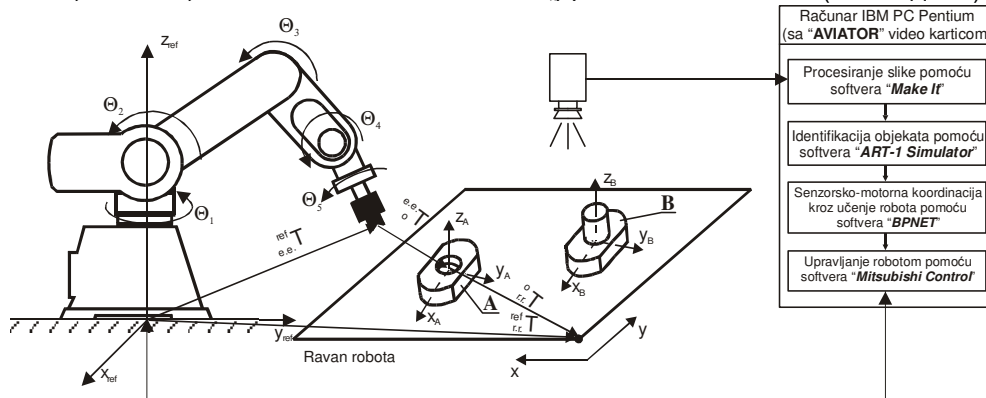
где је NM пресликавање које је реализовано коришћењем ВР неуронске мреже.

Коришћењем ВР неуронске мреже реализује се *NM* пресликавање, односно учење нелинеарних односа између углова ротације у зглобовима робота и визуелних информација о објекту према следећој процедури:

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 $\Delta \boldsymbol{\theta}$ једнаке нули, јер су енд-ефектор робота и објекат у захтеваном међусобном односу;
3. За случајно изабране вредности промене углова ротације у зглобовима робота $\Delta \boldsymbol{\theta}$ 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 $\Delta \boldsymbol{\theta}$ за утврђене положаје призме.

Предност овако конципиране управљачке стратегије је посебно изражена код робота вертикалне зглобне конфигурације, код којих је нелинеарност веома присутна, а да би се то потпуно разумело треба поћи од кинематике робота. Зна се да 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, при чему је $\mathbf{q}_i=\boldsymbol{\theta}_i$ за ротационе зглобове, односно $\mathbf{q}_i=\mathbf{d}_i$ за трансляторне. 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 $\mathbf{q}_i=f^{-1}(\mathbf{X}_e)$, што заправо представља инверзни кинематички проблем. Управљачка стратегија која је развијена и представљена блок-дијаграмом, предлаже управљање и рад аутономног робота слично ономе како функционише човек при препознавању и манипулацији објеката у свом окружењу, с обзиром да се он практично једино налази у неком спољашњем координатном систему. Ако се томе дода и успешно савладавање нелинеарности, онда је предност овог новоразвијеног концепта хијерархијског интелигентног управљања индустријским роботом, у односу на конвенционални, очигледна. Овде је потребно напоменути и то да је степен нелинеарности највећи код вертикалне зглобне конфигурације којој припадају оба коришћена робота, "MITSUBISHI Movemaster-EX" и „Дон Кухом”.

На основу развијеног концепта хијерархијског интелигентног управљања за аутономне индустријске роботе, реализован је интегрисани хардверско-софтверски експериментални систем. Чине га: едукациони индустријски робот "MITSUBISHI Movemaster-EX"¹⁾ или робот сопственог развоја назван „Дон Кухом”, камера "Sony" CCD TR512E, IBM PC Pentium рачунарска платформа опремљена "FAST-AVIATOR"²⁾ - картицом за аквизицију сигнала од камере и софтвери "Make it", "ART-1 Simulator", "BPnet", "MITSUBISHI Control" или „Дон Кухом Control" (слика доле).



Експериментални систем робота " MITSUBISHI Movemaster-EX"

¹⁾ Овај едукациони индустријски робот (модел RV-M1) произвела је Mitsubishi Electric Корпорација.

²⁾ Произвођач картице је FAST Electronic GmbH, <http://www.fastmultimedia.com>.

На слици је показана свеобухватна процедура (са блок-дијаграмом) по којој је експеримент изведен. Наиме, фиксно постављена камера снима објекте и генерише се 2D слика. Развијени софтвер "Make it" после процесирања 2D слике, коришћењем сегментације преко региона, издваја карактеристике објеката и формира бинарни вектор којим се представља препознати објекат. Након тога се реализује идентификација објеката применом развијеног софтвера "ART-1 Simulator", који на основу генерисаног бинарног вектора поступком поређења, односно на основу сличности са објектом који се „тражи“, идентификује објекат коме робот треба да приступи. Када је поступак идентификације објекта завршен и када је позната његова позиција и оријентација у унапред познатој равни радног простора индустријског робота, применом система вештачких неуронских мрежа, односно коришћењем софтвера "BPnet" сопственог развоја, 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.

Кроз обучавање робота и процес машинског учења одређују се позиција и оријентација енд-ефектора робота релативно у односу на положај објекта коме у датом тренутку треба да приступи. Ако се упореди слика експерименталног система са сликом блок-дијаграма управљања уочава се да је број хомогених трансформација смањен елиминацијом оних које су најкомплесније (између објекта и камере, као и камере у односу на енд-ефектор робота), јер предложена и развијена управљачка стратегија хијерархијског интелигентног управљања индустријским роботом то омогућава. Практично је, само при обучавању робота да приступи објекту са одговарајућим позиционирањем и оријентацијом енд-ефектора, односно приликом одређивања унутрашњих координата (углови $\theta_i, i=1,2,\dots,5$), коришћен део управљачких функција постојеће управљачке јединице робота "MITSUBISHI Movemaster-EX" (слика блок-дијаграма). На тај начин су, за различите положаје објекта у изабраној равни радног простора робота, одређене унутрашње координате робота, како би се спровео процес машинског учења робота помоћу развијеног софтвера "BPnet".

Рачунар је коришћен као примарна процесирајућа компонента експерименталног система, који извршава сва неопходна процесирања информација добијених од камере и од робота, док је "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 са својом основном сензорском функцијом и у спроведеном експерименту коришћена је у фиксном вертикалном положају у односу на објекте (помоћу професионалног сталка и држача за "SONY" камере). Она представља екстерни сензор који шаље PC рачунару, опремљеног поменутом "AVIATOR"-картицом, информације о снимљеној слици објекта који се налазе у делу радног простора робота. "AVIATOR"-картица је, после пријема видео сигнала од "SONY" CCD TR512E камере, омогућила даљу обраду слике коришћењем рачунара, уз примену развијеног софтвера. 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. Када се едукациони робот "MITSUBISHI Movemaster-EX" помиње као једна од компонената експерименталног система, онда се под тим подразумева управљачка јединица робота са развијеним оперативним системом, као и серијски механизам робота вертикалне зглобне конфигурације са пет степени слободе кретања. Све техничке карактеристике овог робота дате су у књизи (З.Миљковић).

У току развоја експерименталног система констатовано је да многе комплексне управљачке функције робота "MITSUBISHI Movemaster-EX" нису биле неопходне за остваривање новог концепта хијерархијског интелигентног управљања, тако да се појавила идеја да се реализује неупоредиво једноставнији и јефтинији робот и да се овај концепт тестира на њему. Због тога је настао робот који је добио интригантан назив „Дон Кихот“. Код овог робота су задржане основне управљачке функције неопходне за реализацију задатка манипулације објеката, а у потпуно распрегнути и поједностављени управљачки систем је уграђена интелигентна стратегија управљања. Захваљујући новом приступу у управљању овим роботом експериментални резултати су показали да је за изабрани технолошки задатак резултат машинског учења истоветан, што је потврдило оправданост идеје о настанку овог робота. Неки од публикованих радова у којима се наговештава да интелигентни управљачки систем робота са уграђеном вештачком интелигенцијом може да буде ослоњен на генетичко (еволутивно) програмирање засновано на понашању робота у интеракцији са реалним окружењем (емпиријско управљање), представљали су полазиште за настанак и развој робота „Дон Кихот“. Он има четири степена слободе кретања и припада такође вертикалној зглобној конфигурацији. Све што је битно, а везано је за овај робот, почевши од пројектовања, решавања кинематике, управљања, до техничких карактеристика, дато је у књизи (З.Миљковић).

ПРИМЕРИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО РАЗВИЈЕНИХ ИНТЕЛИГЕНТНИХ УПРАВЉАЧКИХ СИСТЕМА

Успостављена емпиријска управљачка стратегија за аутономне индустријске роботе који користе сензор-камеру и систем вештачких неуронских мрежа је тестирана, а експериментални резултати хијерархијског интелигентног управљања за роботе *"MITSUBISHI Movemaster-EX"* и *"Дон Кухом"* су дати у наставку. Треба нагласити да предложена управљачка стратегија има одговарајуће предности у односу на конвенционалне управљачке системе, с обзиром да данашњи системи индустријских робота, као изразито комплексни објекти управљања, треба да остваре високо квалитетне перформансе и захтеве. Наиме, у литератури је наглашено да овакви комплексни системи у процесу пројектовања и синтезе поседују многобројна ограничења и проблеме који се огледају пре свега у немогућности адекватног моделирања њихове динамике, конзервативног задавања параметара, али и у захтеву за аутономношћу, односно самоорганизованост управљачког система који треба да обезбеди квалитетно и поуздано самофункционисање индустријског робота у условима присутне неодређености у самом систему и реалном окружењу.

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 објеката, а затим и технолошки задатак манипулације, односно аутономно позиционирање и оријентацију енд-ефектора (хватача) робота у односу на препознати објекат. Интелигентно понашање, које подразумева аутономни индустријски робот, је представљено у овом случају кроз адекватну координацију између визуелних информација о објекту добијених од сензора-камере и управљачког система. Реализовано интелигентно управљање роботима *"MITSUBISHI Movemaster-EX"* и *"Дон Кухом"* помоћу сензора-камере и вештачких неуронских мрежа показало се ефикасним у превазилажењу проблема моделирања и појаве неодређености реалног окружења (нпр. промена положаја објеката), јер интелигентно управљање роботима заправо представља адаптивну сензорско-моторну координацију која користи визуелно пресликавање остварено на основу система компјутерског гледања.

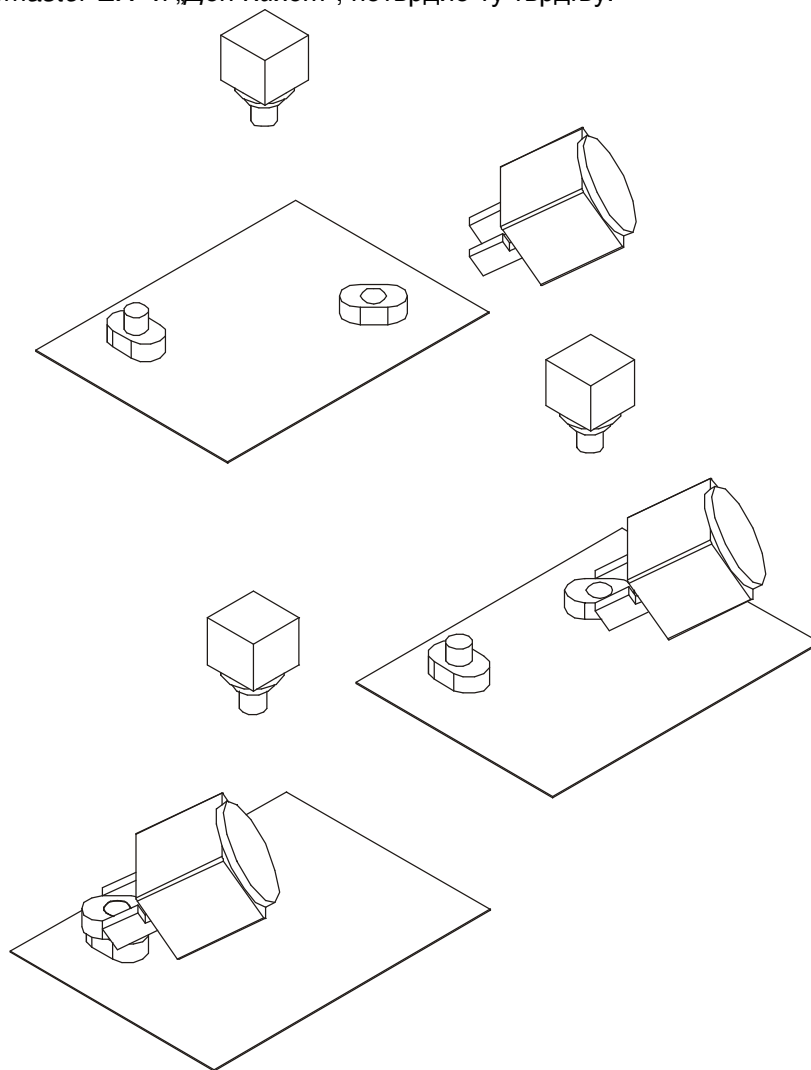
Према литератури, један од најинтересантнијих приступа из ове области представља *СМАС* контролер који је развијен са циљем да се тестира успешност управљања индустријским роботима коришћењем видео камере и асоцијативне неуронске мреже приликом хватања произвољног објекта на покретној траци са фиксном оријентацијом, а да се при томе избегавају разне препреке у радном простору робота. Током машинског учења, визуелни улазни сигнали о објекту се процесирају и комбинују у циљно пресликавање кроз адаптабилне тежинске односе, на основу чега се генерише управљачки сигнал за актуаторе робота. Грешка између стварних управљачких сигнала на актуатору и сигнала добијених израчунавањем, после аквизиције сигнала од камере, се користи за инкременталну промену тежинских односа. Након успешно завршене фазе учења, у току асоцијације, научена сензорско-моторна корелација се користи при препознавању и манипулацији објеката који су слични објектима над којима је извршен процес обучавања.

Слично томе, хијерархијско интелигентно управљање које је реализовано за потребе експерименталне верификације полазне хипотезе, кроз развој система вештачких неуронских мрежа и то за препознавање објеката, као и сензорско-моторну координацију приликом приступања препознатом објекту и његовој манипулацији, у потпуности подржава описани алгоритам емпиријског управљања. Тако је за типичну примену индустријских робота, који најчешће извршавају технолошке задатке манипулације објектима, тзв. *"pick and place"* технолошке задатке и задатке монтаже, извршено тестирање. Ове задатке робот најчешће изводи у неколико фаза (слика у наставку):

1. Приступање препознатом објекту,
2. Хватање објекта, уз одговарајућу оријентацију прстију хватача робота,
3. Премештање објекта на другу локацију и спајање са другим објектом.

Спроведена истраживања се превасходно баве првом фазом реализације задатка манипулације препознатим објектом у функцији спајања са другим препознатим објектом, а то је заправо приступање том објекту уз одговарајуће позиционирање и оријентацију енд-ефектора робота. Тестирана је и друга и трећа фаза у погледу коректног позиционирања и оријентације енд-ефектора. Проблеми који се при спајању објеката јављају нису разматрани. Да би се остварило адекватно хватање објекта, жељено позиционирање и оријентација енд-ефектора игра веома важну улогу. Индустријски робот мора да оствари жељено релативно позиционирање и оријентацију хватача у односу на објекат, који у случају хијерархијског интелигентног управљања може да се налази у сасвим произвољном положају. Ово принудно кретање аутономног индустријског робота у односу на препознати објекат иницира многе тешкоће у току реализације осталих дефинисаних фаза манипулације објектом. То значи да, ако се енд-ефектор робота налази у жељеној релативној

позицији и оријентацији у односу на објекат после фазе 1, фазе 2 и 3, манипулације објектом ће бити остварене лако и успешно, јер се мале грешке позиционирања могу толерисати, а понекад и компензовати на различите начине, пре свега коришћењем система са адаптивном попустљивошћу. Захваљујући визуелној повратној спрези и учењу на бази система вештачких неуронских мрежа, енд-ефектор робота може да заузме детерминисану позицију и оријентацију у односу на препознати објекат. Сходно овој констатацији, спроведен је експеримент који је за два поменута робота, "MITSUBISHI Movemaster-EX" и „Дон Кухом", потврдио ту тврдњу.

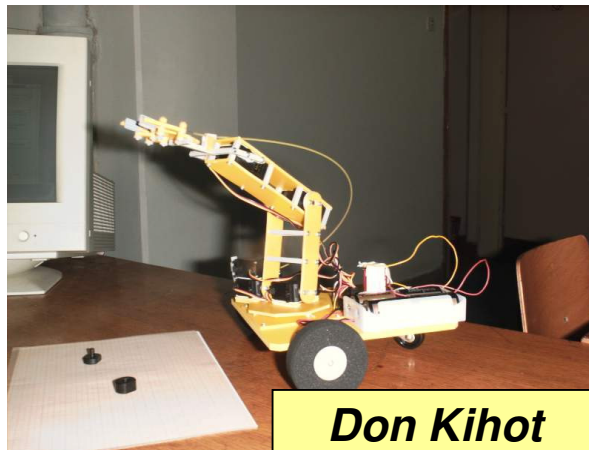


Приступање енд-ефектора робота "MITSUBISHI Movemaster-EX", хватање и манипулација препознатог објекта А приликом постављања на препознати објекат В

Описани експериментални систем за аквизицију сигнала од "Sony" CCD TR512E камере и анализу и процесирање 2D слике обезбедио је, уз развијени "ART-1 Simulator", неопходно препознавање и успешну идентификацију објеката којима треба да приступе енд-ефектори коришћених робота. На основу тих информација, односно сигнала, у овом експерименту је визуелно серво-управљање обезбедило, на бази сензорско-моторне координације помоћу система вештачких неуронских мрежа, генерисање адекватних промена унутрашњих координата, тј. углова ротације у зглобовима робота. Систем вештачких неуронских мрежа користи поред ART-1 и BP неуронску мрежу, управо за сензорско-моторну координацију. За те потребе је развијен експерименталан софтвер "BPnet", који је детаљно презентирани на лабораторијским вежбама. Експеримент се одвијао у неколико корака, тако да је, уз претходну калибрацију камере и процесирање 2D слике објеката (З.Миљковић-књига), као и коришћењем "off-line" поступка машинског учења робота, реализована успешна сензорско-моторна координација између сигнала добијених од камере о објектима А и В (види слику експерименталног система робота) и одговарајућих управљачких сигнала за актуаторе робота, како би се енд-ефектор адекватно позиционирао и оријентисао у односу на препознати објекат А или В. Слике у наставку показују успешне реализације адекватног позиционирања и оријентације енд-ефектора робота "MITSUBISHI Movemaster-EX" и „Дон Кухом" у току спровођења и верификације експеримената.



Приступање и адекватно позиционирање и оријентација енд-ефектора робота "MITSUBISHI Movemaster-EX" препознатом објекту



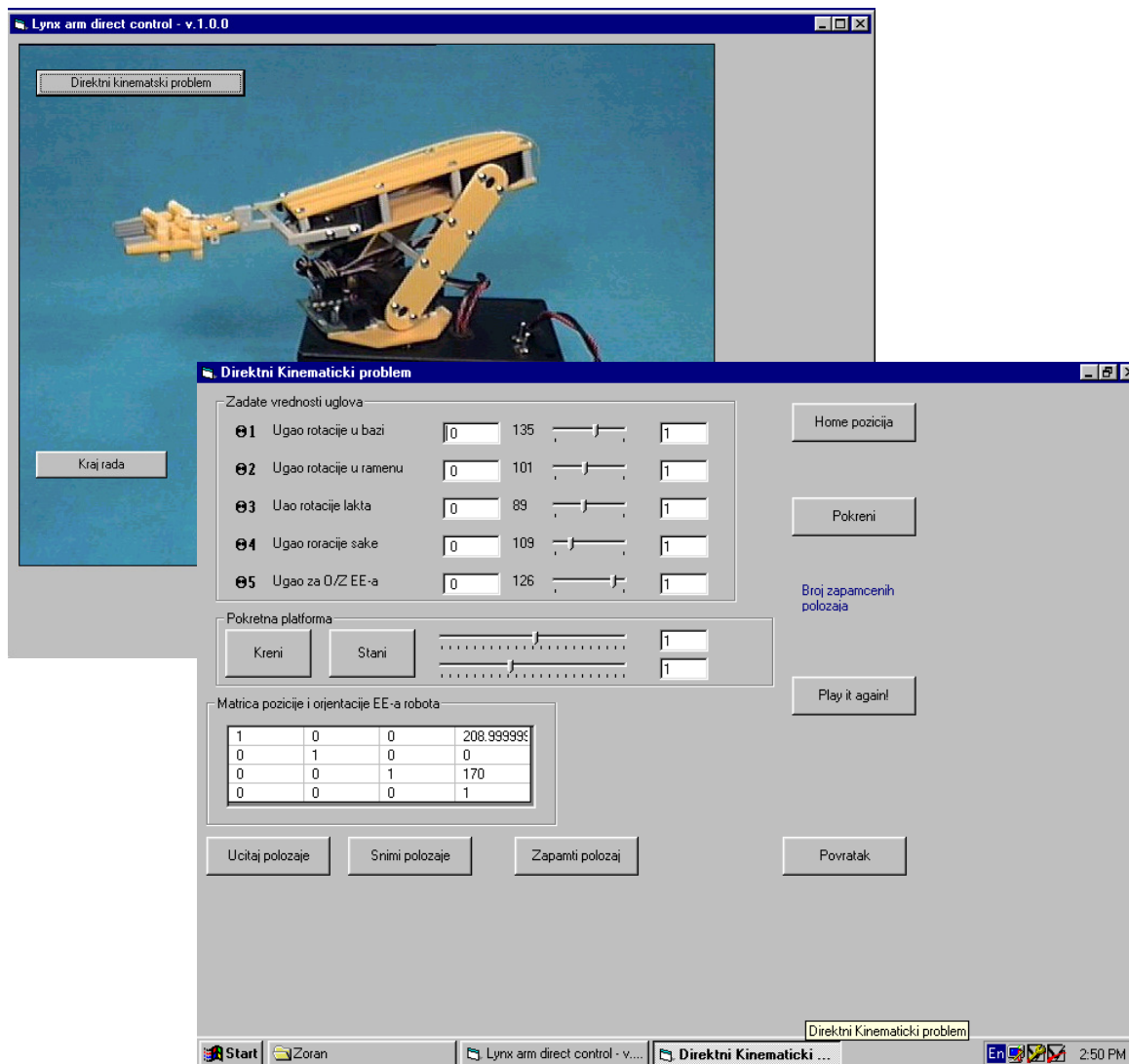
Приступање и адекватно позиционирање и оријентација енд-ефектора робота „Дон Кихот” препознатом објекту

Интелигентно управљање роботима "MITSUBISHI Movemaster-EX" и „Дон Кихот” – резултати

Емпиријска управљачка стратегија која је представљена, подразумева да је покрет робота детерминисан коришћењем информација о објектима добијеним од камере, а које се укључују у процес учења система вештачких неуронских мрежа, како би се остварила сензорско-моторна координација при реализацији технолошког задатка манипулације препознатим објектом. За реализацију те сензорско-моторне координације (машинско учење робота да успешно приступи идентификованом објекту) развијен је показани софтвер "BPnet" у Лабораторији за индустријску роботiku и вештачку интелигенцију Машинског факултета у Београду, који се такође користи и за калибрацију CCD камере. Овај софтвер сопственог развоја је проблемски оријентисан и остварен је програмирањем у Visual Basic-у. Приликом реализације софтвера примењен је описани алгоритам учења за "backpropagation" вештачку неуронску мрежу, при чему је посебно развијана процедура конвергенције грешке ка глобалном минимуму, што је детаљно објашњено у АТ-5. Наиме, процес учења BP неуронске мреже може, у зависности од комплексности проблема и топологије саме мреже, да траје сувише дуго ако се успешно не реши конвергенција грешке при њеном обучавању. Дакле, сада може и практично да се реализује успостављено хијерархијско интелигентно управљање на основу датог алгоритма емпиријског управљања. Да би се установиле и вредности излазног слоја BP неуронске мреже, које представљају углове ротације у зглобовима робота који су учествовали у експерименталном тестирању сензорско-моторне координације, развијена су два софтвера за надзор и управљање овим роботима на извршном нивоу. Пре презентирања добијених експерименталних резултата сензорско-моторне координације руке робота "MITSUBISHI Movemaster-EX" и „Дон Кихот”, представиће се та два софтвера.

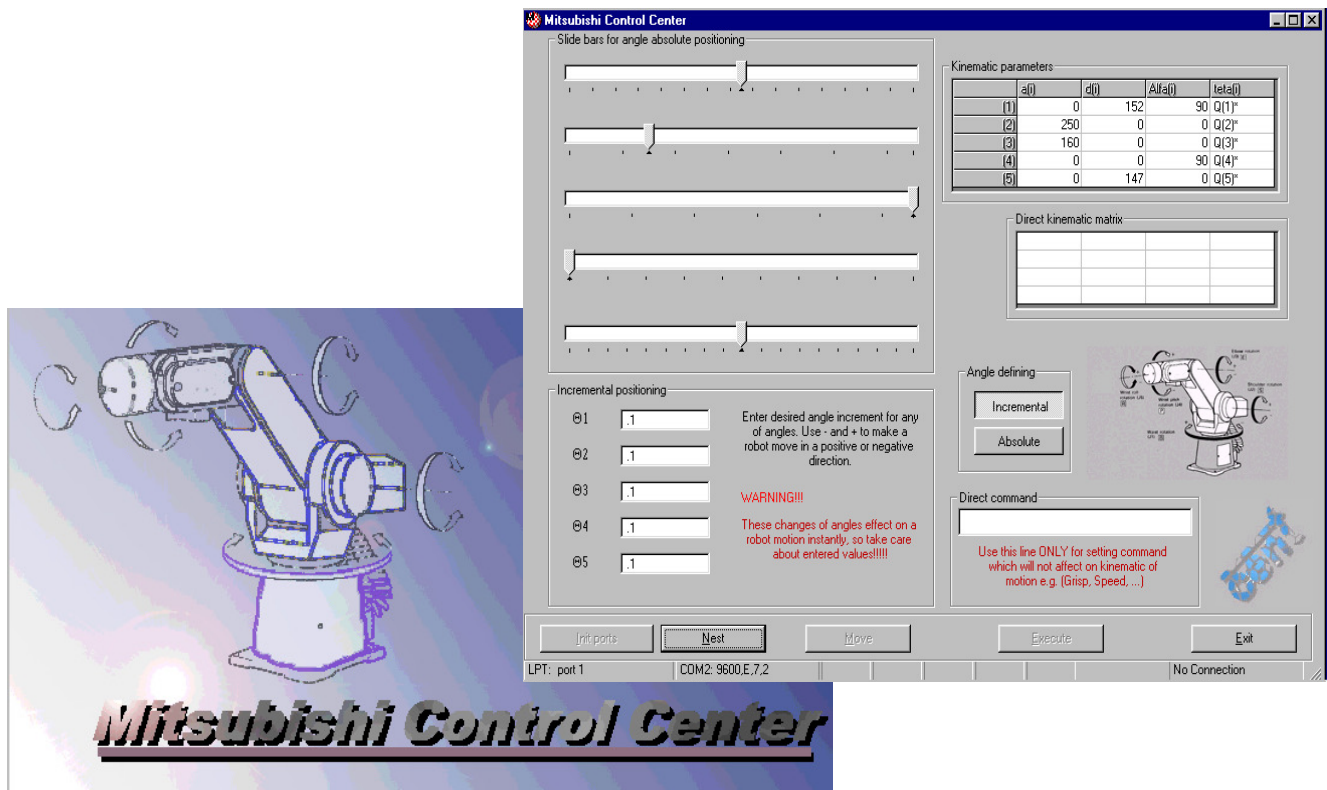
„Дон Кихот” је робот вертикалне зглобне конфигурације са четири степена слободе кретања, а реализован је са циљем да се на једноставном физичком моделу тестира успешност сензорско-моторне координације на бази система препознавања и учења. Да би се реализовао софтвер за надзор и управљање овим роботом било је неопходно да се реши, пре свега директни кинематички

проблем, а затим и инверзни, јер је на основу решене кинематике могла да се утврди позиција и оријентација врха робота у односу на препознати објекат коме робот приступа при манипулацији. Решења директног и инверзног кинематичког проблема су дата у књизи (З.Миљковић). Софтвер је, као и сви у оквиру експерименталног система, урађен програмирањем у *Visual Basic*-у. Основни прозори софтвера су дати на слици у наставку. Уочава се да су у сваком тренутку кориснику доступне неопходне информације о оствареној позицији и оријентацији врха робота, а што је још важније и визуелни приказ остварених углова ротације у сваком зглобу, који представљају излазне вредности из "BPnet"-а, а које у потпуности прате потребно позиционирање и оријентацију енд-ефектора робота у односу на препознати објекат. Поред поменутих опција којима софтвер располаже, такође су реализоване могућности довођења робота у иницијални, тзв. "HOME" положај, као и меморисање више коректно остварених положаја при кретању у функцији манипулације препознатим објектима, односно деловима, итд.



Основни прозори софтвера за управљање роботом „Дон Кихот”

Слично софтверу за управљање роботом „Дон Кихот”, креиран је и софтвер за управљање роботом "MITSUBISHI Movemaster-EX", чији су основни прозори дати на слици у наставку. Софтвер је такође остварен програмирањем у *Visual Basic*-у. С обзиром да је решен директни кинематички проблем, углови ротације у зглобовима овог петоосног едукационог индустријског робота вертикалне зглобне конфигурације се задају тако да је могуће апсолутно или инкрементално померање сваког покретног сегмента, при чему задати инкремент може да буде веома мали (0.1°), што подржавају функције управљачке јединице овог робота. Остварене позиције и оријентације енд-ефектора су дефинисане резултатима добијеним после учења ВР неуронске мреже, тако да вредности углова ротације за сваки зглоб дају неурони у излазном слоју ове вештачке неуронске мреже која је обучавана коришћењем софтвера "BPnet". Резултати за овај робот су, као и за робот „Дон Кихот”, дати у наставку.



Основни прозори софтвера за управљање роботом "MITSUBISHI Movemaster-EX"

Експериментални резултати

Вештачка неуронска мрежа са простирањем грешке уназад (BP неуронска мрежа) је изабрана за одређивање угла ротације у зглобовима робота, јер као што је показано у АТ-5, има способност да изврши пресликавање улазног слоја (позиција и оријентација објекта) у излазни (углови ротације у зглобовима робота). За учење BP вештачке неуронске мреже коришћен је описани алгоритам учења, заснован на генералисаном делта правилу.

Резултати, који су добијени за антропоморфни робот „Дон Кихот” са четири степена слободе кретања при реализацији технолошког задатка манипулације објектом А, односно премештање објекта А ка објекту В, су дати у табели 2, и то за оне обучавајуће парове са којима је BP вештачка неуронска мрежа тренирана, коришћењем софтвера "BPnet". Наиме, две четворослојне BP вештачке неуронске мреже (3x10x10x4 за објекат А и 2x10x10x4 за објекат В) су коришћене за учење робота „Дон Кихот”. Прва мрежа пресликава три улаза који карактеришу позицију и оријентацију објекта А, у четири излаза који представљају углове ротације у зглобовима робота при приступању и хватању објекта А. Друга мрежа пресликава два улаза који карактеришу позицију објекта В (јер се на објекат В поставља објекат А, тако да се у експерименту његова оријентација не разматра, иако постоји и та могућност с обзиром да је одређена - види књигу З.Миљковић, поглавље 5), у четири излаза који представљају углове ротације робота при постављању објекта А на објекат В. Позиције и оријентације објекта А, односно В (дате у табелама 5.1 и 5.2 - види књигу З.Миљковић; вредности су добијене процесирањем и анализом 2D слике објеката и издвајањем њихових карактеристика, што је описано у поглављу 3.2.2, З.Миљковић-књига). Неке од жељених вредности угла ротације у зглобовима робота „Дон Кихот”, потребне да он својим двопрстим хватачем успешно приступи препознатим и идентификованим објектима А, односно В, су дате у табели 1.

Табела 1. Жељене вредности угла за ротационе зглобове робота „Дон Кихот”

	Објекат А				Објекат Б			
	Θ_1	Θ_2	Θ_3	Θ_4	Θ_1	Θ_2	Θ_3	Θ_4
1	-11	-18	13	-20	12.5	-22.5	3	-19
2	-9	-17	14	-20	14	-21	7.5	-15
3	-2	-17	12.5	-19.5	10	-23	3.5	-16.5
...								
18	-10	-23.5	11.5	-4.5	0	-11	16	-20
19	-13.5	-23	13	-3.5	-6	-7	20	-19

После 20 000 итерација ВР неуронска мрежа је завршила процес учења, при чему је остварила минималну грешку (параметар учења се није мењао и имао је вредност $\eta=0.2$), уз тачност, при оцењивању добијених резултата, од 99.6%. Углови ротације у зглобовима робота који, после реализованог процеса учења, одступају од жељених су маркирани и подвучени, што се види у табели 2. Уочава се да одступања финалних вредности углова ротације у појединим зглобовима робота максимално износе до 1° за обучавајуће парове узорака, што у реалним условима значи да је робот „Дон Кихот” после завршеног процеса учења у стању да успешно приступи објекту А, односно В. Заправо, те финалне вредности углова ротације показују да енд-ефектор робота „Дон Кихот” може да се помери са готово идеалним позиционирањем и оријентацијом у односу на објекте А и В. Ако се обучена мрежа искористи за тестирање сопствене робустности, тако што се кроз њу пропусти необучени парови узорака, односно када је позиција и оријентација објеката промењена у односу на оне са којима је процес учења реализован (дато у табели 3.), тада су одступања финалних вредности углова ротације у зглобовима робота у односу на жељене вредности нешто већа и крећу се максимално до 5° (табела 4.). Дакле, максимална апсолутна грешка за необучене парове узорака је 5° , односно релативна грешка је тада 5.5%, што у реалним условима још увек обезбеђује довољно успешно позиционирање и оријентацију енд-ефектора робота у односу на објекат А, односно В. Иначе, брзина учења је била у директној вези са конвергенцијом грешке, тако да се може рећи да је у „off-line” поступку обучавања ВР вештачких неуронских мрежа, за остварење постављеног експеримента, утрошено време сведено на четрдесетак минута, при чему је коришћена данас већ веома скромна стандардна IBM PC Pentium рачунарска платформа.

Табела 2. Жељене и финалне вредности углова у зглобовима робота „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>	<u>-19.5</u>	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

Табела 3. Положаји за тестирање

	Објекат А			Објекат В	
	X_K	Y_K	Θ	X_K	Y_K
1	43	94	12.5	21.6	56
2	45	56	-5	52.5	109
3	44	72	0	57.9	106.9

Табела 4. Жељене и финалне вредности углова за ротационе зглобове робота „Дон Кихот” (тест положаји)

	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

Резултати, који су добијени за антропоморфни робот „MITSUBISHI Movemaster-EX” са пет степени слободе кретања при реализацији технолошког задатка манипулације објекта А, односно В су у складу са претходним, чиме је потврђена постављена хипотеза о способности робота да успешно учи на основу визуелних информација о објектима којима треба да приступи при извршењу технолошког задатка манипулације. 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) су такође коришћене за учење робота. Прва мрежа пресликава

три улаза који карактеришу позицију и оријентацију објекта *A*, у пет излаза који представљају углове ротације у зглобовима робота при приступању и хватању објекта *A*. Друга мрежа пресликава два улаза који карактеришу позицију објекта *B* у пет излаза који представљају углове ротације робота при спајању објекта *A* са објектом *B*. Позиције и оријентације објекта *A*, односно *B* су дате у табели 5.4. (види књигу З.Милковић). Жељене вредности углова ротације у зглобовима робота које су потребне да робот "MITSUBISHI Movemaster-EX" својим енд-ефектором (двопрсти хватач) приступи препознатим и идентификованим објектима *A*, односно *B*, су дате у табелама 5. и 6.

Табела 5.		ОБЈЕКАТ <i>A</i>									
		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	<i>Обучени</i>	-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	<i>Необучени</i>	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 <i>B</i>									
		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	<i>Обучени</i>	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	<i>Необучени</i>	-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 <i>A</i>			ОБЈЕКАТ <i>B</i>						
		X_K	Y_K	Θ	X_K	Y_K					
1 (2)	<i>Обучени</i>	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	<i>Необучени</i>	169	56	-2.3	128.7	118.5					
13		136	38	0	220	67					
19		131	51	-10	206	34					

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 %. Углови ротације у зглобовима робота који, после реализованог процеса учења одступају од жељених, су маркирани и подвучени, што се види у табелама 5. и 6. Очигледно је да одступања максимално износе такође 1° за обучене парове узорака, а ако се ВР неуронска мрежа искористи за тестирање њене робустности тако што се кроз њу пропусти необучени парови узорака, и то када је положај објеката промењен (дато у табели 7.), одступања углова ротације у зглобовима робота у односу на неопходне углове ротације су тада, као и за робот „Дон Кихот”, максимално до 5° .