

МЕТОДЕ ОДЛУЧИВАЊА

АТ-8 Интелигентне машине и одлучивање

АУТОНОМНИ МОБИЛНИ РОБОТ – ИНСЕКТ РОБОТ

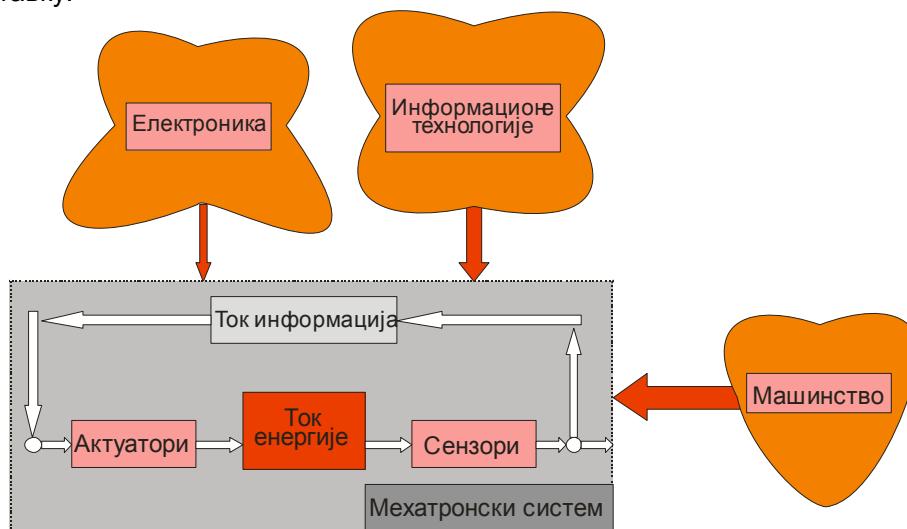
Мехатронски системи и интелигентно управљање

Током осамдесетих година XX века издвојила се нова област инжењерског ангажовања, коју најкраће зову *мехатроника*. Појам *мехатроника* је данас дефинисан на више међусобно сличних начина, а класична дефиниција довољно јасно тврди: „*Мехатроника је синергетична комбинација машинства високе тачности, електронског управљања и информационих система при пројектовању производа и процеса*”.

Наиме, *мехатроника* је инжењерска област мултидисциплинарног карактера и базирана је на систем анализи, моделирању и управљању. Роботи (индустријски, мобилни, персонални, итд.), као и многе данашње машине, представљају мехатронске системе који су реализовани коришћењем функционалних подсистема као што су:

- Савремени управљачки и информациони подсистеми;
- Подсистеми међусобних веза, базираних на претходно дефинисаним протоколима;
- Сензорски подсистеми са способношћу издвајања корисних информационих сигнала;
- Актуаторски подсистеми за трансформацију изворне енергије у користан рад;
- Механизми за извршење жељених кретања у функцији процеса.

Синергијом машинства, електронике и информационих технологија, у поједностављеном тумачењу *мехатронике*, могуће је одредити општу структуру мехатронског система, што је показано на слици у наставку.



Општа структура мехатронског система

Дакле, када се конвенционалном електро-механичком систему додају расположиви сензори и актуатори уз одговарајући ток информација и енергије, тада је могуће разликовати две врсте интеграције код новонасталог мехатронског система:

1. Интеграција компонента (хардверска интеграција),
2. Интеграција преко процесирања информација (софтверска интеграција).

Приликом поређења карактеристика конвенционалног и мехатронског система, кроз предности које се остварују интеграцијом, уочљиво је то да, што се хардверске интеграције тиче, мехатронски систем има компактне компоненте, једноставне механизме, аутономне јединице и комуникацију помоћу комуникационих магистрала (LAN мреже, MAP протоколи), док у погледу софтверске интеграције он поседује нелинеарно програмабилно дигитално управљање, супервизорско праћење са дијагностиком грешака и способност машинског учења. У погледу процесирања информација, за мехатронски систем важи и то да је његов подсистем интелигентног управљања заправо *суштинска квалитативна надградња* у односу на конвенционални, што се детаљно разматра у наставку овог текста.

Нови приступ роботици – инсект робот

Нови мехатронски концепт у роботици подразумева пројектовање аутономних мобилних робота (AMP) са сензорима, актуаторима, извором енергије и интелигентним управљањем, смештеним и фабрикованим унутар једног силиконског чипа. Тако интегрисан микроробот-инсект робот има многе предности у односу на пређашње генерације робота, за које и даље важи да су скупи, гломазни и углавном су ограничене могућности примене.

Наиме, инсект работи имају карактеристике које одговарају новом мехатронском концепту: *аутономност при одлучивању*, једноставан *слојевит управљачки систем*, *интегрисане сензоре и актуаторе*, све *мању величину* (тежи се величини од неколико милиметара) и знатно *нижу цену*. Изузетно је широк опсег примене инсект робота, тако да се од апликација у индустрији првенствено очекује да раде на пословима у електронској индустрији. Наиме, уколико би се негде на штампаној плочи појавио прекид у електричном току, инсект робот би имао задатак да, лаганим кретањем и испитивањем проводности између ножица чипова, утврди локацију прекида, тако што би мерио кондуктивност полупроводника. На месту прекида би извршио повезивање прекинутог тока, с тим да својом структуром практично обезбеди затварање електронског кола. То значи да инсект робот од тог тренутка постаје саставни део штампане плоче.

Да би све што је претходно речено било и физички оствариво потребно је развити нове технологије за израду: *микросензора*, *интелигентних управљачких система*, *актуатора*, *извора енергије и система за интеграцију*.

Микросензори треба да пруже инсект роботу могућности опажања околине, како би реаговање робота било усклађено са захтевима реалног окружења. За креирање интегрисаног микроробота потребно је да микросензори буду компатибилни са IC (*Integrated Circuit*) технологијом, како би добили минијатурно и јефтино „паковање”. Тренутно је на тржишту расположив читав низ микросензора, од хемијских, преко инфрацрвених, оптичких сензора до минијатурних CCD камера.

Интелигентан управљачки систем је заснован на неуро-контролерима или пак на коначним аутоматима. Актуатори су базирани на микромоторима и минијатурним механизмима. Микромотори раде на електростатичком принципу, или пак на пиезоелектричном. Мотори који раде на постулатима електромагнетизма су исувише велики за нову генерацију микроробота. Електростатички мотори користе силиконску технологију, имају елементе који не прелазе габаритну величину од 150 μm и могу бити линеарни и обртни, што је за актуаторе који се у микророботици примењују, такође веома битно.

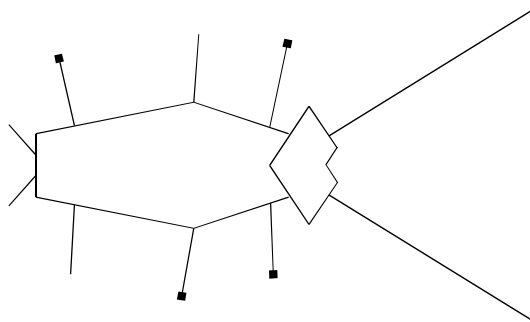
Енергетски извори инсект робота су: соларне ћелије и батерије које морају бити веома лаке. Соларна енергија у овој области захтева нова истраживања, јер је потребно обезбедити изолацију између ћелија када се оне у серијама смештају у исти чип, што још увек ствара озбиљне проблеме. Захваљујући систему за интеграцију свих описаних елемената у тзв. „*on board*” чип, драстично је смањен број међусобних веза, чиме је поред компактности доста постигнуто и у погледу минимизирања величине робота и његове масе.

На основу претходно изнетог, треба посебно нагласити због чега инсект работи могу да мењају област роботике. Пре свега због ниске цене коштања, која имплицира многе даље последице, попут следећих:

- одржавање робота је искључено,
- специјална пажња при коришћењу робота више није потребна,
- потреба за резервним деловима није присутна,
- замена хаварисаног робота је крајње једноставна.

Поред јефтине производње инсект робот у милионским серијама, предност нове технологије израде робота је изражена и у погледу „*масовног паралелизма*” при извршењу задатка. За разлику од „великих” робота који се данас користе за специфичне задатке, нпр. при чишћењу корита брода од шкољки, могуће је паралелним процесом рада великог броја „сићушних” инсект робота обавити успешно исти задатак. Дакле, инсект работи су пројектовани тако да буду једноставни, јефтини, а уједно представљају потпуно интегрисане минијатурне машине које могу да доносе одлуке.

Инсект робот припада новој генерацији аутономних мобилних робота, који своје интелигентно понашање у непознатој средини исказују коришћењем принципа вештачке интелигенције. Ниво интелигенције AMP је истоветан понашању инсеката у реалном свету, на нивоу примитивних функција које извршавају, попут хаотичног кретања, тражења хране, заобилажења препрека и сл. Механизми закључивања приликом доношења одлука код интелигентних бића су засновани на једноставним чињеницама, па је отуда оправдано креирати, на почетку развоја, и интелигенцију робота на основама интелигенције инсеката, тако да нова генерација робота има интересантан и у оквиру претходно уведеног контекста сасвим очигледан назив **инсект работи** (слика у наставку).



Аналогија између инсекта и модела инсект робота

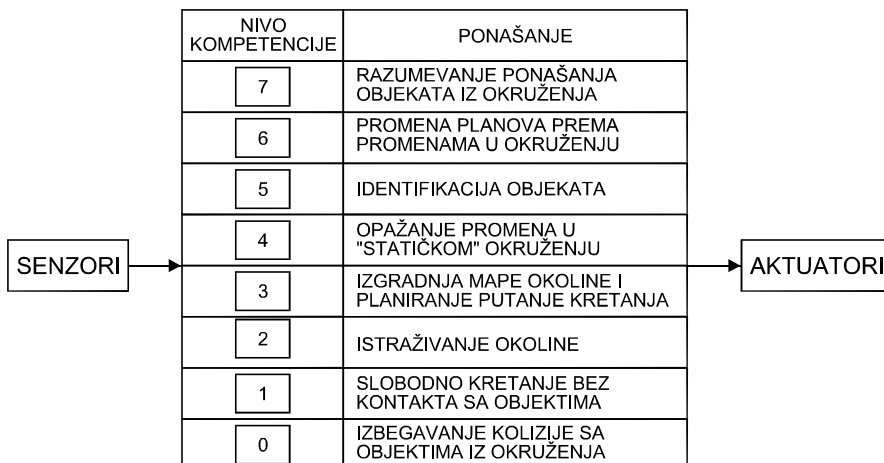
Декомпозиција интелигентног управљачког система аутономног мобилног робота

Вештачка интелигенција у данашњој роботизици доживљава радикалне промене и базира се на чињеници да су роботи „слободни“ у свом „радном свету“, да „искушавају“ тај свет директно преко сензорске стимулације, како би користећи повратне сигнале, на бази машинског учења, доносили одлуке о акцијама које ће предузети. Дакле, интелигентни управљачки систем контролише понашање робота које је условљено могућношћу опажања околине са којом је у интензивној интеракцији.



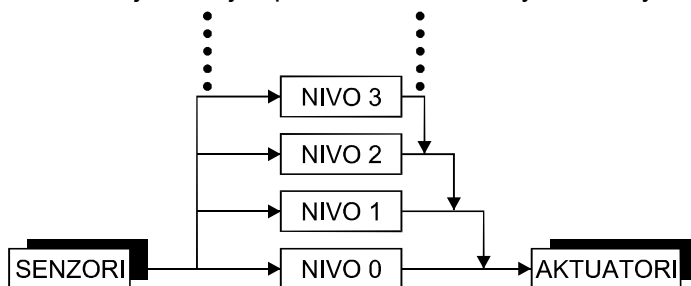
Традиционална декомпозиција управљачког система на функционалне модуле

Како АМР захтева обраду комплексних информација, интелигентан управљачки систем мора да изврши процесирање великог броја сигнала у реалном времену, те је напуштена традиционална декомпозиција управљачког система на функционалне модуле у серијском поретку (слика горе) и приступа се декомпозицији управљачког система на независно конципиране модуле, који у паралелном поретку извршавају управљање задатком постигнутог понашања АМР (слика доле).



Декомпозиција интелигентног управљачког система АМР на независне модуле понашања

Декомпозиција интелигентног управљачког система у паралелном поретку има дефинисане нивое компетенције, који представљају одговарајуће класе понашања AMP у интеракцији са окружењем. Виши нивои компетенције имплицирају специфичније класе понашања. Кључна идеја увођења нивоа компетенције се огледа у томе да је могуће изградити слојевит управљачки систем, који може да приступа сваком од нивоа компетенције додајући, уколико је за извршење задатка потребно и више нивое компетенције, што је приказано на слици у наставку.



Слојевит управљачки систем базиран на нивоима компетенције

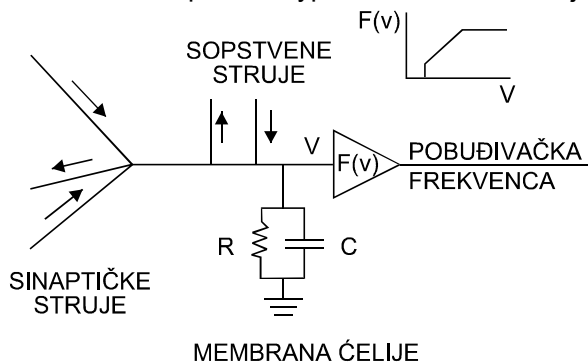
Систем може да функционише парцијалним коришћењем било ког нивоа компетенције, јер и нижи слојеви управљачког система су потпуно оперативни. **Prof. Rodney Brooks** (MIT) је такав систем управљања назвао **архитектура укључивања** ("subsumption architecture"), јер су практично сви нивои од нултог до седмог, у паралелном поретку, укључени у управљање.

Дакле, управљачки систем назван **архитектура укључивања** подразумева укључивање нових виших нивоа компетенције ослоњених на претходне ниже, а да при томе ти нижи нивои нису експлицитно дефинисани потпрограми ("subroutines"), већ су потпуно заокружени управљачки модули. Структуру управљачког система чине микропроцесори који сваки понаособ представљају машину са коначним бројем стања, тј. аутомат који има коначан број различитих унутрашњих стања ("finite state machine"), са способношћу да обраде одређене структуре података. Битно је напоменути да је сваки од приказаних модула (слика на претходној страни) практично **коначни аутомат**, који може да ради са нпр. структуром података формираних у LISP-у.

Нови приступ вештачкој интелигенцији у данашњој роботичкој не искључује традиционални, што значи да није *a priori* искључено знање из информационог садржаја робота, али оно не сме да буде ограничење за управљање роботом. То значи да постоје додирне тачке, али да је пажња развојних истраживања окренута ка креирању потпуно неструктурисане средине која је много ближа реалном свету-окружењу са којим би требало да је робот у сталној интеракцији.

Неуронски управљачки систем инсект робота

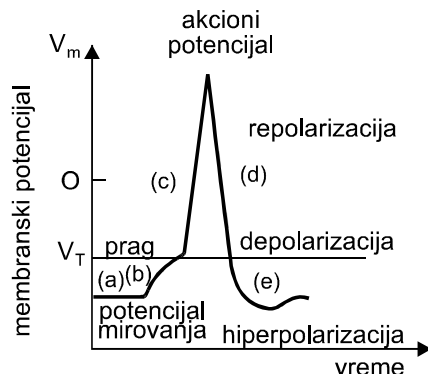
AMP представља роботску структуру која, као што се види (на приказаној слици уочљива је аналогија између инсекта и симулационог модела инсект робота), има изглед и ниво понашања веома сличан инсекту, те отуда и интригантан назив **инсект робот**. **Инсект робот** има шест ногу које му обезбеђују функцију ходања, антenske (тактилне) сензоре у пару, напред и позади, као и неуронски локомоциони контролер. Неуронски модел инсект робота је успостављен са циљем да обезбеди основу за развој вештачког неуронског система (Artificial Neural System - ANS; види AT-7), заснованог на принципима хетерогених неуронских мрежа, уз обезбеђивање реализације функција и интелигентног понашања AMP. Шематски приказ неуронског модела дат је на слици доле.



MEMBRANA ĆELIJE
Шематски приказ неуронског модела

Он репрезентује екситациону (побуђивачку) фреквенцу неуронске ћелије као нелинеарну функцију њеног улазног потенцијала. Такође је приказано пасивно RC својство мембране ћелије, као и сопствена струја ћелије, која је у функцији од мембранског потенцијала. Промена мембранског

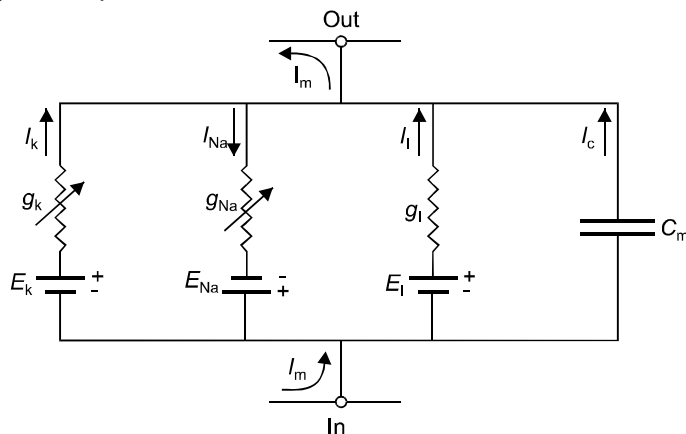
потенцијала за време активности неурона, приликом преноса сигнала на већу удаљеност, приказана је на слици у наставку. Види се да је потенцијал мировања нервне ћелије око -60 mV (a), да деполаризација ћелије (b) може бити „експлозивна“ (c), да би одмах затим процес реполаризације (d) био настављен у врло кратком временском интервалу, како би на крају потенцијал тежио нормализацији (e).



Дијаграм промене мембранског потенцијала за време генерисања акционог потенцијала

Хиперполаризација смањује способност нервне ћелије да генерише акциони потенцијал, што значи да има *инхибиторни ефекат*, док деполаризација повећава ту способност, па је *екситациона*. Акциони потенцијал неурона почиње променом потенцијала мировања, његова вредност на прагу деполаризације V_T ћелије постаје импулсивна и веома позитивна (слика горе под c), траје кратко и враћа се на ниво потенцијала мировања, да би затим, у кратком временском интервалу, следећи акциони потенцијал био генерисан.

Према моделу мембране *Hodgkin-Huxley_a*, датог на слици доле, потенцијал мировања је представљен у електричном колу помоћу извора струје, док је пропустљивост мембране (Conductance $G=1/R$, јединица пропустљивости $1S=1\Omega^{-1}$) представљена отпорником променљивог интензитета. Тој шеми је додат кондензатор који представља капацитет мембране, а излазна величина овог система је електрични напон.



Hodgkin-Huxley_a ево електрично коло које представља модел мембране неурона

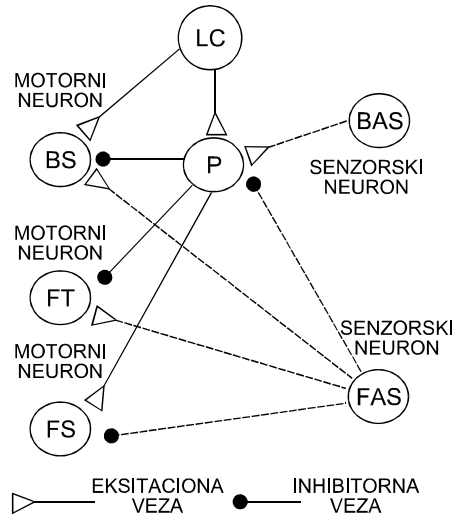
Мембрански потенцијал сваког неуронског модела (слика на претходној страни) може бити представљен помоћу диференцијалне једначине, дате у општем облику у наставку:

$$C_N \cdot \frac{dV_N(t)}{dt} = \sum_{M \in \text{pre}(N)} S_{M,N} F_M(V_M(t)) + \sum_{L \in \text{int}(N)} INT_L(t, V_N(t)) + EXT_N - V_N(t)G_N$$

- где су:
- C_N - мембранска капацитативност неурона N,
 - $V_N(t)$ - мембрански потенцијал неурона N,
 - $\text{pre}(N)$ - сет неурона који формирају синапсе неурона N,
 - $S_{M,N}$ - јачина везе од неурона M до неурона N,
 - $F_M(V_M(t))$ - побуђивачка фреквенца неурона M,
 - $\text{int}(N)$ - сет сопствених струја неурона N,
 - $INT_L(t, V_N(t))$ - вредност сопствене струје L,
 - EXT_N - вредност спољашње струје која је уведена на неурон N,
 - G_N - мембранска провoдљивост (пропустљивост) неурона N.

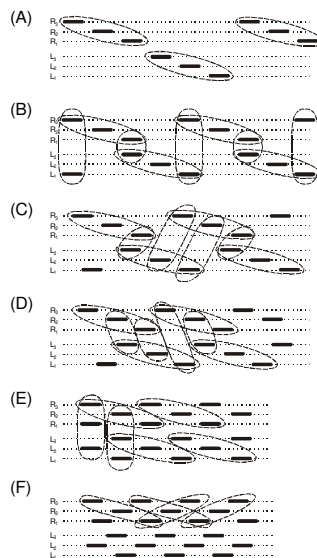
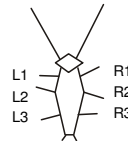
Хетерогена вештачка неуронска мрежа коју чине овакви неурони, представљена је куплованим сетом ових диференцијалних једначина.

Локомоција (кретање) инсект робота представља његову основну функцију, тако да **неуронски локомоциони контролер** мора да координира покрете свих шест ногу робота, како би се остварило задовољавајуће ходање. Да би инсект робот остварио задатком наметнуто понашање (нпр. монтажа-регенерација чипа), мора да поседује могућност да се креће кроз радну средину различитим брзинама, без промене стабилности. Зато је локомоциони контролер робустан¹, тако да мале сметње ходу робота, попут колизије са објектима из околине, не могу да га озбиљно угрозе. *Неуронски локомоциони контролер* је шематски приказан на слици доле. Неурони на левој страни шеме контролера су моторни неурони који управљају кретањем ногу инсект робота, док су неурони на десној страни сензорски неурони. На слици се види да P представља „пејсмејкер“ неурон чија побуђивачка фреквенца варира ритмично, а LC је командни неурон који користе сви контролери рада ногу инсект робота.



Шематски приказ неуронског локомоционог контролера

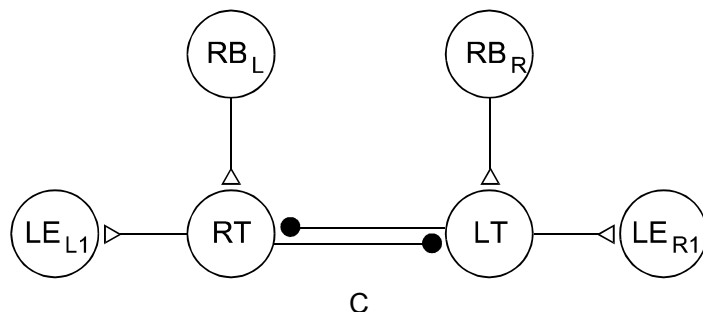
Екситационе везе су приказане као троуглови, а инхибиторне везе као попуњени црни кругови. Основни централни патерн-генератор је приказан пуним линијама, а испрекидане линије репрезентују сензорске повратне везе (неке везе, попут FAS-BS, FAS-FT, FAS-FS укључују и рефлексе). Слика у наставку приказује типично остварене „капије“ приликом кретања инсект робота спорим ходом (A) и бржим ходом (F), а уобичајена брзина хода је приказана шемом под (D) и (E).



Шематски приказ кретања инсект робота

¹ Робустан – јак, снажан, крепак, чврст

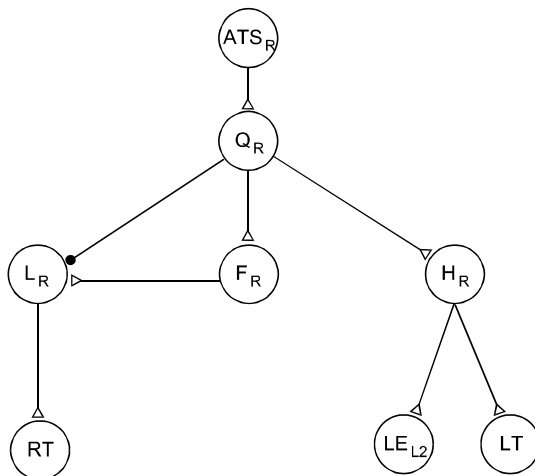
Претходно описани неуронски локомоциони контролер је пројектован искључиво за праволинијска кретања, а инсект робот приликом „истраживања“ околине мора често да изврши закретање. Зато се у неуронску мрежу уграђују и неурони LT (за закретање у лево), односно RT (за закретање у десно), а неуронске ћелије RB имају улогу „пејсмејкера“ при регулацији мембранског потенцијала на нижи и виши ниво (слика доле). Хаотично кретање приликом „истраживања“ околине је уобичајено почетна фаза рада AMP, тако да је путања којом се робот креће, рекло би се нетипична.



Неуронски контролер хаотичног кретања инсект робота

Заобилажење препрека, односно кретање AMP дуж ивице објекта, такође припада категорији интелигентног понашања робота, тако да су у неуронски модел контролера, за тај вид локомоционих активности, уграђени додатни неурони, за оријентацију. Они имају задатак да угледе, под којим се тело робота налази у односу на ивицу објекта, смање или повећају како би се инсект робот налазио паралелно у односу на објекат дуж чије ивице се креће (слика у наставку, H_R неурон и L_R неурон).

Аntenски тактилни сензор (ATS_R) генерише ниво раздвајања, чија је фреквенца пропорционална углу између тела робота и ивице објекта у тачки додира. Директан контакт производи високи фреквентни одзив, а благи додир ниску фреквенцу. ATS_R побуђује неурон Q_R, који има велику капацитативност потребну да инсект робот утврди дисконтинуитете на ивици објекта коју прати. Неурон Q_R активира неурон F_R, који има низак праг деполаризације и такође велику капацитативност, тако да имплементира хистерезис интелигентног понашања AMP приликом кретања дуж ивице објекта, а задатак му је и да оствари везу са неуроном L_R.



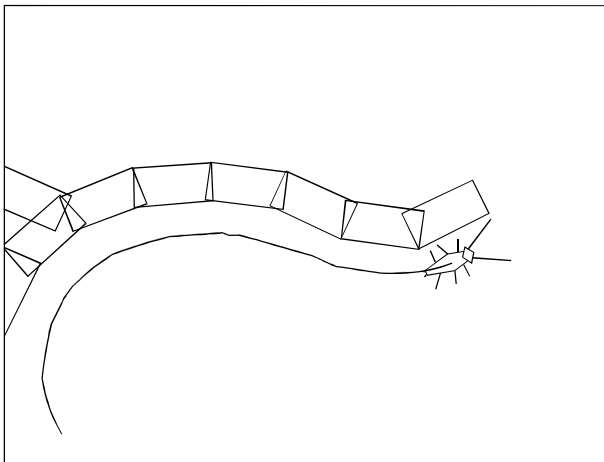
Неуронски контролер кретања инсект робота дуж ивице објекта

Симулација рада инсект робота

Симулациони програмски пакет **ИНСЕКТ** је развијен на основама које су поставили *Pat* и *Greg Williams*, који је заснован на хетерогеним вештачким неуронским мрежама. Програмски пакет **ИНСЕКТ** представља потпуно нови приступ вештачкој интелигенцији у роботици, урађен је у програмском језику *TURBO C* и у односу на основни софтвер уведени су и креирани нови неурони и неуронске мреже.

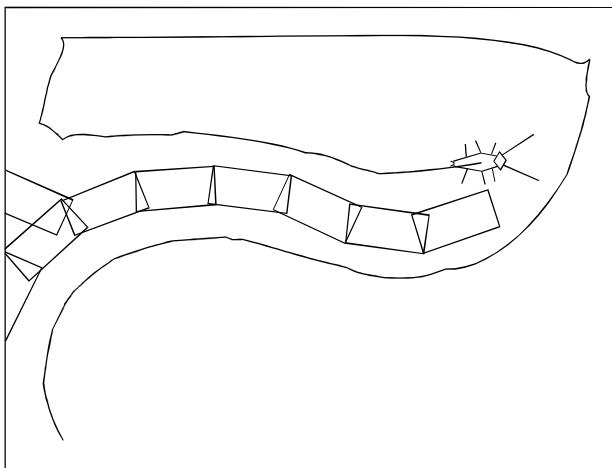
Свака од примитивних функција, која представља један вид интелигентног понашања *инсект робота*, остварује се одговарајућим механизмом неуронских контролера, за које се може рећи да су у међусобној вези, јер нпр. хаотично кретање *инсект робота* и кретање дуж ивице (види слику у

наставку), имају кохерентан² ниво заједничког понашања. Принцип декомпозиције интелигентног понашања *инсект робота* у паралелном поретку, према *архитектури укључивања* и уједно *одлучивања* (објашњено раније), у потпуности је реализован кроз концепт новог типа АМР, тако што је за свако индивидуално понашање робота развијен посебан неуронски контролер, што значи да не постоји централизован управљачки систем. У многим случајевима, интеракција која се захтева за остваривање два вида интелигентног понашања, директно је имплементирана преко експлицитних веза између одговарајућих командних неурона.



Путања кретања *инсект робота* приликом праћења ивице објекта

Тако, нпр. кретање дуж ивице може да искључи хаотично кретање преко инхибиторне везе између свог кључног неурона и кључног неурона контролера за хаотично кретање. Код локомоционог контролера командни неурон *LC* управља и брзином кретања робота. Овај командни неурон може да се допуни модификованим неуронима *LCS* и *LCF* који имају задатак да зауставе и поново започну кретање робота, у зависности од других активности које се у оквиру укупног понашања АМР одвијају. Приликом „истраживања“ окружења *инсект робот* прати објекте кретањем дуж ивице са десне, односно са леве стране, те је самим тим унутар контролера за кретање дуж ивице активиран леви или десни тактилни, сензорски неурон (антене – лева или десна) који одређују статус моторних, актуаторских неурона (слика доле). Робот на тај начин одређује положаје објеката у свом „радном свету - окружењу“.



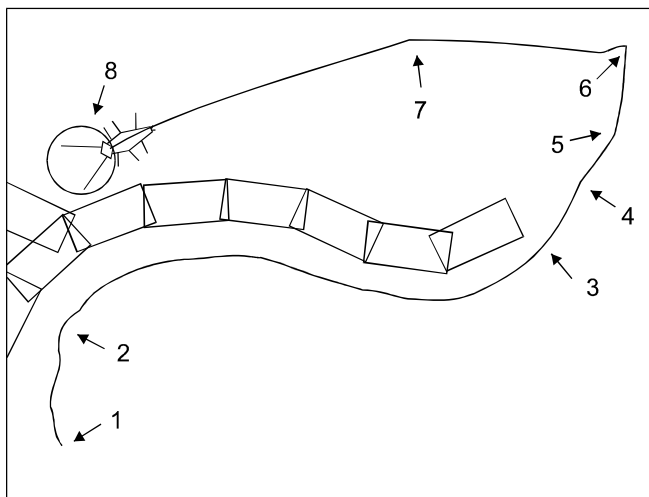
Истраживање окружења робота праћењем ивица објеката и зидова

Комплетан вештачки неуронски систем (АМР) *инсект робота* садржи 78 неурона и 156 веза, са могућношћу проширивања. Пример реализације интелигентног понашања, дат на слици у наставку, илуструје једноставан проблем „истраживања“ околине, са крајњим циљем проналажења локације за извршење радног задатка монтаже-регенерације чипа, унутар радног простора *инсект робота*.

Робот почиње кретање из позиције (1), лаганим померањем у (2) почиње да прати објекат кретањем дуж његове ивице, а у (3) када губи контакт са њим закреће се тражећи евентуално нови додир са објектима из окружења (4) и слободним кретањем („лутањем“) из (5) се креће уз ивицу зида

² Кохерентан – повезан, спојен, скопчан

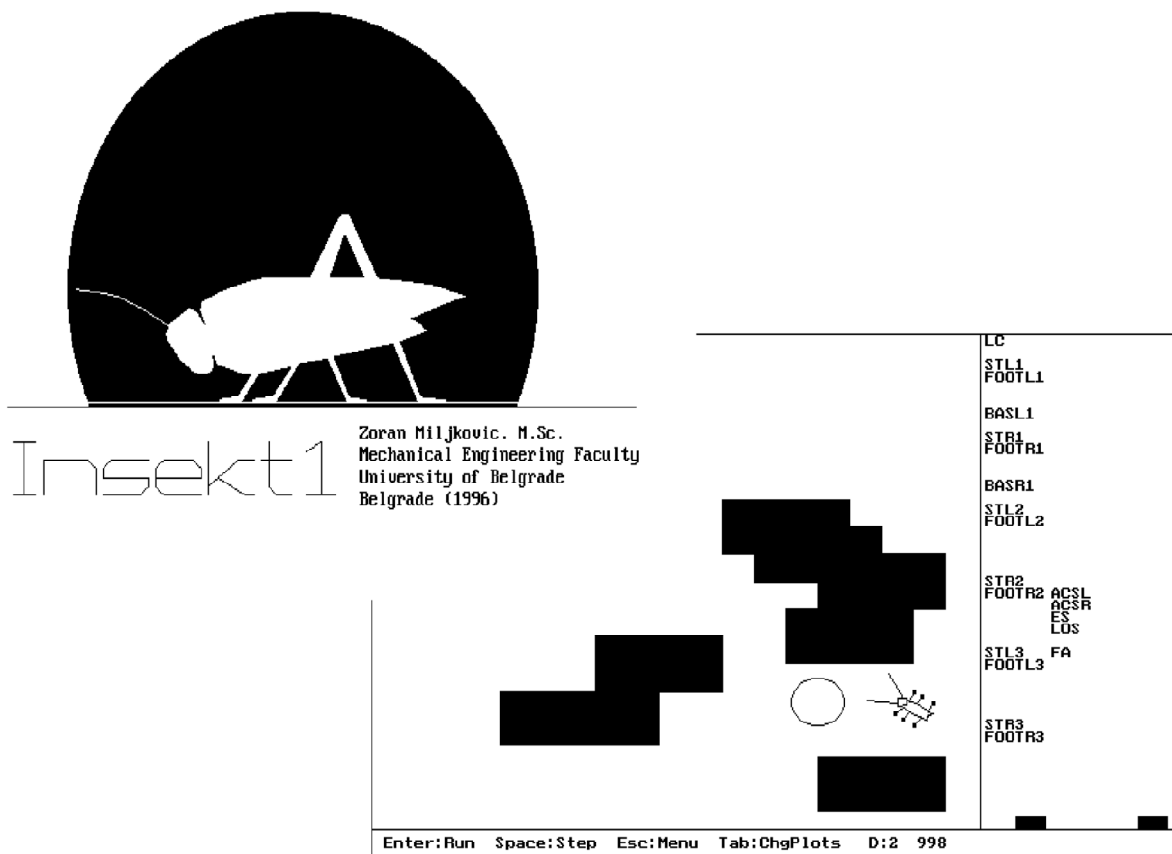
преко (6) да би у (7) напустио ивицу зида, јер је препознавањем уочена позиција (8) на којој ће се извршити радни задатак монтаже-регенерације чипа.



Путања кретања *инсект робота* приликом решавања једноставног проблема „истраживања“ околине унутар радног простора

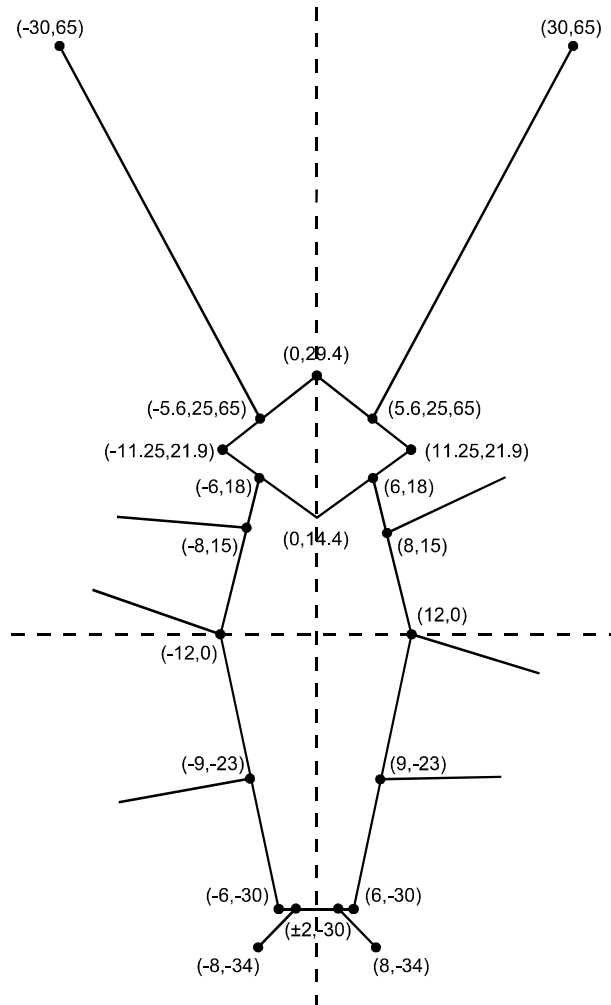
Пример пројектоване структуре

Симулациони програмски пакет (модификовани) „*Инсект 1*“ (слика доле) презентира интелигентно управљање *инсект роботом*, који је одређен преко својих физичких и неуронских параметара. Као што је речено *инсект робот* физички, а и његов ниво интелигенције, одговара реалном инсекту, тако да прецизни *layout* симулационог модела, приказан на слици на следећој страни, пружа детаљан увид у структуру робота.



Основни прозори симулационог програмског пакета „*Инсект 1*“

У оквиру истог координатног система дефинисане дужине ногу су 17, 15 и 17 за предње, средње и задње ноге, респективно. Ове дужине су одређене за случај када су ноге подигнуте.



Прецизни *layout* симулационог модела

Угао ротације у зглобу сваке ноге је лимитиран у границама $[\pi/5, 0]$, $[\pi/12, -\pi/12]$ и $[\pi/12, -\pi/8]$ радијана за предње, средње и задње ноге, респективно. Према конвенцији, угао ротације ноге је једнак 0, када је она нормална на тело робота, позитиван је угао у смеру кретања казаљке на сату за ноге на левој страни тела робота, а за ноге на десној страни тела је позитиван угао у супротном смеру кретања казаљке на сату. Тежиште целе структуре робота се налази у координатном почетку (види слику горе).

Статичка стабилност робота је одређена положајем тежишта, у смислу да ли се оно налази или не, унутар полигона који формирају ноге које у положају на тлу представљају ослонце структуре робота. Уколико се тежиште не налази унутар полигона тело робота пада. Ако се статичка стабилност робота не успостави у временском периоду од 40 ms, робот се враћа у стање пре него што је равнотежа нарушена. Када се робот налази у нестабилној равнотежи активирају се силе чији су вектори паралелни са телом или су управни на тело робота, како би се извршило кретање translацијом напред или назад или пак кретање ротацијом у страну. Интензитет „паралелних“ сила је 50, а „латералних“ 7. Константа пропорционалности између брзине робота и „сила“ је 100, а између угаоне брзине и „момента“ 5000.

Контакт са објектима се региструје преко „антена“ које су у пару постављене напред и назад. Колизација се детектује када једна од четири специфициране тачке на „антенама“ (види слику горе) задире у физичку препреку. Када се то догоди робот се повлачи у правцу нормале на ивицу са којом је контакт остварен.

Што се неуронских параметара тиче, сваки неуронски модел чине следећи параметри: мембранска проводност (G мембране), мембранска капацитивност (C мембране), минимална побуђивачка фреквенца (F_{\min}), напонски праг (V_T) и појачање. Комплекснији неуронски модели (попут `rasemaker_a`) имају додатне параметре као што су: сопствена струја I_L и I_H (low – ниска, high – висока) и параметри регулације T_L и T_H . Сензорски неурони имају такође параметар сопствене струје I_{senzora} , чија је величина у функцији од интензитета неке физичке вредности. Веза између неурона A и B је означена симболички $A \rightarrow B$, а тежински однос те везе је дат у nA (nano ampere, $1nA = 10^{-9}A$). Сложенија веза, у којој је нпр. неурон C у синаптичкој вези са A , а који је у вези са B , дата је симболички преко $C \rightarrow (A \rightarrow B)$.

Неуронски контролер (види слику приказану раније) за сваку ногу *инсект робота* има следеће неуронске параметре:

Неурон LC

G мембране: $0.1 \mu S$

C мембране: $75 \mu F$

V_T : $-3 mV$

F_{\min} : 0.25

Појачање: $0.1 mV^{-1}$

Расемакер – неурон P

G мембране: $0.5 \mu S$ I_H : $20 nA$

C мембране: $10 \mu F$ T_H : $75 ms$

V_T : $10 mV$

Појачање: $0.1 mV^{-1}$

I_L : $-10 nA$

Моторни неурон BS

G мембране: $0.5 \mu S$

C мембране: $10 \mu F$

V_T : $0 mV$

Појачање: $0.1 mV^{-1}$

Моторни неурон FT

G мембране: $0.5 \mu S$

C мембране: $10 \mu F$

V_T : $0 mV$

Појачање: $0.1 mV^{-1}$

Моторни неурон FS

G мембране: $0.5 \mu S$

C мембране: $10 \mu F$

V_T : $-2 mV$

Појачање: $1 mV^{-1}$

Статус стопала: *АКО* је побуђивачка фреквенца >0 *ТАДА* је стопало на тлу доле *ИНАЧЕ* је стопало горе.

Сензорски неурон BAS

G мембране: $0.5 \mu S$

C мембране: $5 \mu F$

V_T : $5 mV$

Појачање: $1 mV^{-1}$

$I_{\text{сензора}}$: *АКО* је угао ротације ноге \leq максималном углу *ТАДА* је $10 nA$ *ИНАЧЕ* је $0 nA$.

Сензорски неурон FAS

G мембране: $0.5 \mu S$

C мембране: $5 \mu F$

$V_T : 5 \text{ mV}$

Појачање: 1 mV^{-1}

$I_{\text{сензора}}$:

АКО је угао ротације ноге \geq максималном углу ТАДА је 10 nA ИНАЧЕ је 0 nA.

Везе између неурона

$LC \rightarrow BS : 5 \text{ nA}$

$LC \rightarrow P : 10 \text{ nA}$

$P \rightarrow BS : -10 \text{ nA}$

$P \rightarrow FT : -4 \text{ nA}$

$P \rightarrow FS : 10 \text{ nA}$

$BAS \rightarrow P : 10 \text{ nA}$

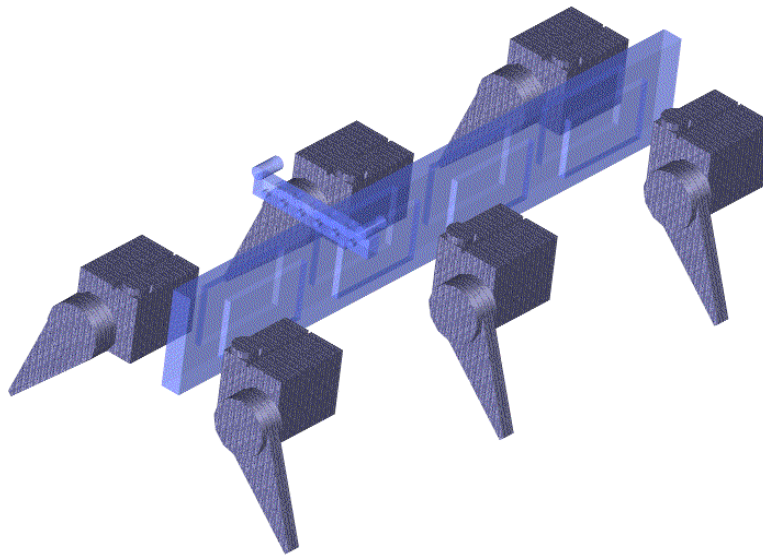
$FAS \rightarrow P : -15 \text{ nA}$

$FAS \rightarrow BS : 10 \text{ nA}$

$BAS \rightarrow FT : 10 \text{ nA}$

$FAS \rightarrow FS : -15 \text{ nA}$

На основу концепта који је проверен преко симулационог програмског пакета „**Инсект 1**“ могуће је креирати и пројектовати физичку структуру *инсект робота* која је приказана на слици доле.



Физички модел инсект робота