

Универзитет у Београду Машински факултет

Одсек (модул) за ДИЗАЈН У МАШИНСТВУ

Катедра за ДИЗАЈН У МАШИНСТВУ Предмет: БИОНИКА У ДИЗАЈНУ

Број регистра: 1216/08

Илија Р. Стевановић

ДИПЛОМСКИ (M.Sc.) РАД

Тема:

Развој минијатурног робота на основу искуства које је инспирисано природом

Београд, 16. 04. 2011

Комисија за преглед и одбрану

- 1. Професор Др Бошко Рашуо
- 2. Проф. Др Милосав Огњановић
- 3. Доцент Др Александар Симоновић

Датум одбране: _____

Оцена:_____

Овера студентског одсека:....

Предметни наставник

..... Професор Др Бошко Рашуо

Шеф катедре одсека (модула)

Професор Др Милосав Огњановић

Продекан за наставу

..... Професор Др Драган Марковић

Задатак дипломског (М.Sc.) рада

- Решења које је природа створила еволуцијом за своје биолошке продукте или еко-системе су по правилу најекономичнија, најинтелигентнија и најближа свеопштим идеалима за дате услове у којима су настали. Та искуства су драгоцена и неисцрпан су извор за развој нових, напредних иновативних техничких система. Суочени са свим изазовима и проблемима које нам је досадашњи индустријски "развој и прогрес" модерног друштва донео, по питању нерационалне потрошње енергије, повећања загађења животне средине, гомилања отпада и изумирања великог броја различитих врста живог света, човек је све више принуђен, да у циљу свог опстанка, за развој нових производа, решење и инспирацију потражи у природи.
- У раду је потребно дефинисати комплетну методологију пројектовања минијатурног робота за чије дизајнирање је укључен бионички аспект. Такође, анализирати неопходне биомеханичке особености кретања које треба да поседује минијатурни робот који се креће уз помоћ ногу по различитим подлогама.
- У раду дати, детаљан пројекат мини-робота са шест ногу. Потребно је скицирати и моделирати мини-робота и све његове потребне механизме за кретање у окружењу савремених програмских пакета (Autodesk 3ds Max, SolidWorks и др), а потом, треба формирати математички модел кретања робота у програмском пакету Matlab - Simulink (Sim Mechanics). Потребно је обезбедити анимационе механизме, симулацију и анализу динамичког понашања система кретања мини-робота у окружењу виртуелне реалности.

Београд, 16. 04. 2011

Предметни наставник

Професор Др Бошко Рашуо

1.	УВОД - БИОНИКА		
	1.1 HEXBUG – Alpha микро робот	8	
2		0	
Ζ.	РОБОТИ КОЈИ КРЕ ћу уз ПОМОЋ НОГУ: МОТИВАЦИЈА И ИЗАЗОВИ	9	
	2.1 Истраживање и анализа оиолошких система који је крепу уз помоп ногу		
	2.2 Гезулгати истраживања и анализа		
	2.2.1 Први заклаучак		
	2.2.2 Други заклыучак		
	2.2.5 Трени закъручак		
3.	SOLIDWORKS		
	3.1 Дизајнирање тела робота		
	3.2 Дизајнирање погонског ротора са ексцентром		
	5.5 Дизајнирање ноге росота		
	5.4 Дизајнирање контактие сензорске антене		
	3.5 Дизајнирање полуге механизма робота		
	3.0 Дизајнирање поклопца робота		
	5./ Дизајнирање осигурача у механизму росота		
	2.0 Улачирање склопа родота		
	5.9 Креирање анимације механизма		
4.	МАТЛАБ	33	
	4.1 Структура програма и процеса креирања математичког модела робота у Матлабу		
	4.2 3D модел осигурача механизма робота (Pin-4)		
	4.3 3D модел ротора-2 робота (Eccentric shaft-2)		
	4.4 3D модел полуге механизма робота (Rod 1-3)		
	4.4 3D модел ноге робота (Leg 2 -2)		
	4.5 3D модел сензорске антене (Sensor right-1)		
	4.6 3D модел поклопца робота (Cover-final-1)		
	4.7 3D модел тела робота (Body-1)		
	4.8 Генерисање блок дијаграма математичког модела робота		
	4.9 Machine Environment (Env) блок		
	4.10 Ground блок	53	
	4.11 Weld блок	53	
	4.12 Body блок		
	4.13 Cylindrical блок		
	4.14 Planar блок		
	4.15 Revolute блок	61	
	4.16 Joint Actuator блок	63	
	4.17 Constant блок	64	
	4.18 Joint Sensor блок	66	
	4.19 Scope блок	67	
	4.20 Scope блок у блок дијаграму - пример	68	
	4.21 Повезивање сензора са ослонцима осовина са ексцентром	69	
	4.22 Приказивање очитаних вредности са сензора на улежиштењу	70	
	4.23 Body Sensor блок	72	
	4.24 Приказивање очитаних вредности са сензора на телу	74	
5	3DS MAX	77	
J.	5 1 Ралне површине и команлни интерфеје		
	5.1 гадне површине и командни интерфеје		
	5.2 дефинисано кретања по осама у току времена 5.3 Креирање 3D окружења		
	5.4 3D окружење са унетим молелима робота	85 8/	
	5 5 3D окружење - камера 1		
	5.6 3D окружење - камера 2		
	5.7 3D окружење - камера 3		
	5.8 3D окружење - камера 4	90	
	cie c2 cipjacine nanopa initiation initiatio initiation initiatio initiatio initiatio initiatio initiatio init		

6. ЗАКЉУЧАК	91
7. ЛИТЕРАТУРА	92
8. ПРИЛОГ	93
Прилог 1 SimMechanic – Simulink блок дијаграм математичког модела робота	

1. Увод - Бионика

Бионика значи учити од природе и то примењивати у техници.

Бионика је у суштини је мултидисциплинарна наука која интегрише елементе:

- биологије,
- математике,
- геометрије,
- механике,
- физике,
- хемије,
- естетике и сл.

Одатле следи да постоји више различитих начина да се опише појам Бионике.

- Биологија + Техника = Бионика
- Техника инспирисана природом
- Техничка биологија
- Механика живих система
- Биолошки дизајн
- Биотехника

Учити од природе значи пренети знања о конструисању и поступцима из природе у технику.

Бавити се техничком биологијом значи истраживати и описивати природу уз уношење основа техничких наука, као и физике.

Постоји читав низ биолошких проблема који се могу одговарајуће уобличити, истражити и описати уношењем техничко-физичких спознаја.

Истраживања те врсте доводе до прекорачења граница између научних дисциплина. Техничка биологија не познаје границе и она управо "живи" од прекорачења тих граница.

Она представља истраживачку дисциплину и начин гледања, али пре свега алат.

Одатле следи да се бионика може различито примењивати, али као и при употреби било којег другог алата, коначни резултат зависи од тога да ли је алат правилно употребљен.

У многим својим деловима бионика све више представља стратегију преживљавања за будући развој човечанства.

За разлику од индустријске револуције, "бионичка револуција" се заснива не на ономе шта се може узети од природе, већ на ономе шта се може научити од ње.

Суштина бионичког приступа је у проучавању принципа организације и функционисања живих система и практична примена тог знања у актуелним задацима савременог дизајна и технике, копирањем изванредних решења које је природа обезбедила живим организмима вековним еволутивним усавршавањем.

Природна решења су по правилу најекономичнија, најинтелигентнија и најближа идеалнима. Живи свет на нашој планети је, међутим, до те мере разнолик и са међусобно нимало сличним начинима функционисања, да би упознавање конструкције и принципа дејстава сваког појединачног биолошког система захтевало једно свеобухватно знање. С друге стране, савремена наука је својим све даљим напретком довела до све ужег опсега проучавања у оквиру уско специјализованих научних дисциплина.

Први корак ка обједињавању, односно интеграцији научних дисциплина, и то на основу сличности принципа управљања живим и неживим елементима, начинила је кибернетика, а корак даље управо прави бионика. Она, наиме, обједињује, пореди и приближава конструктивна решења према већ образованим живим организмима; она сажима сазнања из ботанике и електронике, неурофизиологије и кибернетике, биохемије и механике, па се у старијој литератури може наћи и под називима биотехника или, евентуално, примењена биофизика, али све чешће као бионика или биомиметика.

Практична реализација бионичког приступа одвија се на три нивоа, па се може рећи да постоје три методологије у оквиру бионике: биолошка, математичка и техничка.

Биолошка бионика користи сазнања из ботанике, зоологије и медицине за издвајање оних начела функционисања посматраног живог организма, који могу успоставити суштинску везу са техничким проблемом који треба решити.

Потом се приступа математичкој обради тог биолошког садржаја, такозваном биолошком моделирању, при чему математички модели верно пресликавају процесе из живих организама који су за дати проблем од посебног значаја.

Коначно, техничка бионика има задатак да обезбеди практично применљиву и технички остварљиву реализацију одговарајућег математичког модела.

Током милиона година еволуције разноврсних биолошких система, пред природу су се непрестано постављале бројне потешкоће. Смисао и циљ бионике је управо да препозна и повеже одговарајућа аналогна ограничења која су бивала постављена пред природу са ограничењима која се постављају пред савремену технологију.

У сваком случају, мора се приметити извесна сличност између позиције коју заузима природа при "дизајнирању" биолошких решења за своје живе прототипове и актуелног дизајнерског и инжењерског гледишта. Заједничко им је првенствено свеопшта тежња ка најштедљивијем, односно најекономичнијем концепту - у првом случају у смислу што веће уштеде енергије, а у другом у смислу најниже цене.

У природи се овај принцип огледа у томе што су биљни и животињски организми у циљу преживљавања у борби за опстанак, развили начине функционисања коришћењем минималних енергетских ресурса. Оваква биолошка решења подразумевају ефикасност како у метаболичком смислу тако и у оптималном уносу енергије, довољном за постизање основних животних функција. Веома слична ситуација јавља се и у техници од чијих се решења захтева максимална ефикасност, с обзиром на то да је цена често најзначајнији параметар.

Заправо због тога звучи сасвим разумно да би идеје из природе, адекватно интерпретиране и примењене, могле да унапреде постојеће и утичу на будуће конструкције и то на различитим нивоима. Овај трансфер технологије у ствари и представља бионика или, под другим именом, биомиметика.

Суштина бионичког приступа је управо у томе да се дизајнери, пројектанти, инжењери и конструктори, односно људи који су задужени за увођење иновација подсете да природа увођењем својих нових "техника" за своје прототипове не изазива никакве, или евентуално минималне штетне последице по околину, као и да се права решења морају потражити у њој.

Појам "бионика" увео је на конгресу у Дејтону/Охајо (Dayton/Ohio) 1960. амерички ваздухопловни официр Џ. Стил (J. E. Steele). Тим се изразом пре свега желело назначити да треба "учити од природе за технику".

Појам је био нов, али не и поступак. Од 16. века све до нашег доба протеже се ланац покушаја да се иде управо тим путем. Ретко су ти покушаји довели до успеха.

Слепо пресликавање природе у екстремним случајевима у размери 1:1 не може функционисати нити то има везе са науком.

Узме ли се, међутим, природа као подстицај за технички и технолошки развој, то може довести до запањујућих резултата.

Друга дефиниција бионике, заснована на радовима немачког биолога родоначелника бионике, Вернера Нахтигала (Werner Nachtigall), каже да је бионика научна дисциплина која се бави техничком трансформацијом и применом принципа конструисања, поступака и развоја биолошких организама. Дакле, бионика је јасно формулисана дисциплина и поступак. Она доводи, помоћу "техничке биологије" до техничке трансформације и примене откривених и истражених аспеката биологије на технику.

То се може односити на три подручја, наиме:

- на конструкције природе - конструкцијска бионика,

 на поступке или процесе трансформације материје и енергије у природи трансформацијска бионика,

- на начела преноса информација, развоја и еволуције - информацијска бионика.

Нахтигал сматра да је дошао последњи тренутак да се технолошки напредак "свргне" са диктаторске позиције коју је постепено заузео и уклопи у дубоку међузависност услова који владају у реалном свету, при чему то првенствено подразумева прилагођавање технике биолошким системима, а не обрнуто. [1]

1.1 HEXBUG – Alpha микро робот

Имајући све ово у виду постојала је жеља да се у раду прикаже анализа карактеристика играчке робота. Да се његов механизам и све његове мане и предности погледају кроз призму бионичких и инжењерских метода.



Слика 1.1 HEXBUG – Alpha микро робот [2]



Слика 1.2 HEXBUG – Alpha микро робот – скица са основним димензијама коришћена при моделирању

2. Роботи који крећу уз помоћ ногу : Мотивација и Изазови

У данашње време може изгледати да већ постоји много различитих начина кретања робота по копну, пример за то су возила са точковима или гусеницама, која су способна да се крећу великим брзинама и да због тога није потребно разматрати кретање уз помоћ ногу као алтернативу.

Са друге стране мора се приметити да перформансе традиционалних мобилних робота у многоме зависе од природе окружења у којој се крећу. У ствари отприлике половина површине копна је недоступна за таква возила. Покретљивост робота преко неприступачног - са много оштрих ивица и нестабилног терена захтева машине које се крећу уз помоћ ногу. Иако за многе примене традиционалне мобилне платформе са точковима обезбеђују задовољавајуће испуњење постављених захтева по питању робустности и енергетске ефикасности, на дуже стазе системи који су способни да функционишу у широком дијапазону услова терена ће бити роботи који имају ноге.

Ипак, роботи са ногама поред својих очигледних предности доносе и многе проблеме са инжењерско дизајнерске тачке гледишта. За разлику од традиционалних, управљање овим роботима захтева детаљно разумевање њихове динамике. Већина њихових карактеристика које ће показати на терену су уско повезана са њиховом механичком структуром за чију анализу постоје различити алати које сам применио у овом раду. Контрола великог броја зглобова и одређивање броја степена слобода за сваки зглоб на који ће се поставити актуатори у поређењу са малим бројем степена слобода код стандардних решења мобилних робота представља велики изазов у дизајнирању таквих система.

Постоје већ развијена различита решења, од Бруксовог Genghis-a i Case Western Robota II који користе статички стабилне врсте кретања на тај начин што се центри маса налазе унутар статички стабилних ослонаца ногу, до RHex робота који је замишљен да се ослања више на динамичко проучавање кретања. За први концепт је неопходно да се робот креће са релативно малим брзинама где је кинематика доминантна. За случај RHex робота динамика кретања у динамичком окружењу је оно на чему се инсистирало.



Слика 2.1 – Rodney Brooks - Genghis



Слика 2.2 Case Western - Robot II



Слика 2.3 DARPA - RHex 1.1 (sa kamerom)

У поступку дизајнирања робота који се покрећу ногама је неопходно наћи компромис између слободе кретања на једној страни и смањења поузданости услед повећања броја актуатора којима се та кретања омогућавају на другој страни. Уколико се направи превише комплексан систем тада се такође јавља и проблем управљања јер са данашњим софтвером и хардвером још увек није могуће обезбедити задовољавајућу пропусну моћ управљачких сигнала уколико желимо да се робот креће већим брзинама.

Постојећи биолошки системи имају способност да се по потреби пребацују из једног режима кретања у други. Из режима где је битно да систем буде статички стабилан на уштрб брзине у начин кретања где је битно да буде брз уколико мора да побегне од предатора или да стигне плен где је статичка стабилност у другом плану.

Дизајнирати робота који би био подједнако добар у оба режима кретања би био идеал којем би требало тежити.

2.1 Истраживање и анализа биолошких система који је крећу уз помоћ ногу

Вршена су истраживања на тему кретања различитих биолошких система која имају ноге. Посматрањем је покушано дефинисати неке генералне принципе који су при томе испуњени.

Међутим то није ни мало лак задатак. Чак и неки од најједноставнијих биолошких система у истраживању као што су на пример инсекти имају веома комплексне системе за кретање. Они су занимљиви због тога што могу веома лако да се крећу по најразличитијим теренима и подлогама.



Слика 2.4 Анализа система за кретање једног инсекта

Инсекти имају веома велики број степена слободе у својим зглобовима ногу. Веома велики број мишића који то све покрећу и веома велики број неурона којима је то све повезано. Једноставно копирање таквих система у данашње време је практично немогуће. Уместо тога покушано је да се схвате основни принципи који такво кретање омогућавају.

Оно што је рађено у лабораторијама је да је поред утврђивања редоследа контаката ногу са тлом такође и мерена сила којом објекти који се крећу уз помоћ делују на подлогу.

На слици 2.5 се види да су се различити биолошки системи који су се испитивани на покретним тракама (човек, инсект и краба).

2.2 Резултати истраживања и анализа

Дошло се до веома занимљивих резултата. Сви испитивани објекти имају заједничке особине при кретању иако се то на први поглед не би могло претпоставити.

2.2.1 Први закључак

Први закључак је да је контрола механизма за кретање при кретању уграђена у сам механизам за кретање. Дакле механизам за кретање се сам по себи прилагођава окружењу. То је постигнуто његовим исправним дизајнирањем. На тај начин се проблем кретања по неравном терену у многоме упрошћава. Да би се инсект кретао преко непознатог и неравног терена потребно је само да одреди правац и брзину којом ће се кретати. Ноге

остало одрађују "саме" својим дизајном. Нису потребни никакви специјални сензори у њима нити нека специјална контрола ногу да би се то постигло.

2.2.2 Други закључак

Други закључак је да се у зависности од броја ногу и брзине хода користе различите врсте капија односно распореда ногу током сваког корака при кретању.

2.2.3 Трећи закључак

Трећи закључак до којег се дошло мерењем сила којима објекти који се крећу ногама делују на подлогу је да се сви понашају као да се читава њихова маса налази на штапу за скакање са опругом, слика 2.7. И то за човека је то у једном кораку једна нога а у другом друга нога са слике 2.6. За пса у једном кораку две наспрамне ноге, рецимо оне означене жутом бојом са слике 2.6 се могу представити као један пого штап. За инсекта са шест ногу у једном тренутку три ноге у контакту са подлогом се могу представити једним пого штапом итд.

При томе предње ноге инсеката служе за успоравање а задње за погон односно убрзавање кретања. Дијаграми сила се могу видети 2.8.



Слика 2.5 Анализа система за кретање различитих биолошких система на покретним тракама



Слика 2.6 Обрнуто клатно са опругом у различити системима кретања биолошких система



Слика 2.7 Пого штап – штап за скакање са опругом и аналогија са ногама кенгура



Слика 2.8 Дијаграми сила у додиру са подлогом при кретању инсекта

2.2.4 Четврти закључак

Четврти закључак је да није само вертикална раван та у којој је могуће као код пого штапа одскакање од подлоге. То је примећено да се дешава и у хоризонталној равни, односно да се систем понаша као да је и у хоризонталној равни за тело повезан штап са опругом и пригушницом, слика 2.8.

Модел у вертикалној равни Модел у хоризонталној равни



Слика 2.8 Анализа модела инсекта у вертикалној и хоризонталној равни



Слика 2.8 Анализа тела инсекта као осцилаторног система



Слика 2.9 Неправилан терен по којем инсект може да се креће без проблема

Захваљујући свим овим особинама уколико инсекта поставимо на терен као са слике 2.9 неће доћи до пада перформанси у кретању у односу на равну површину. [3]

3. SolidWorks

За реализацију 3D модела робота и његовог механизма за кретање овом приликом је коришћен програм SolidWorks 2009.



Слика 3.1 – SolidWorks интро

На слици 3.2 се види радна површина и командни интерфејс програма у којем је модел израђен.



Слика 3.2 – SolidWorks (радна површина и командни интерфејс)

Поступак креирања модела у SolidWorks програму се састоји из више корака. Потребно је дизајнирати одвојено сваку компоненту (тело, делове погонског механизма, ноге, сензорске антене, итд.) А затим од тога свега начинити машински склоп.

3.1 Дизајнирање тела робота

Потребно је да се у једној од главних равни (Top Plane) направи скица са жељеним димензијама. Та скица нам користи да се орјентишемо у погледу димензија модела.



Слика 3.3 – SolidWorks (радна површина и скица)

Затим се конструишу помоћне равни онолико колико их је потребно да би смо добили тродимензионални модел тела робота.



Слика 3.4 – SolidWorks (помоћне равни и контурне ивице модела)

Након тога, користећи команду (Boundary Surface) креирамо површину између две суседне контурне ивице и добијамо први део контуре површине омотача тела.



Слика 3.5 – SolidWorks (горњи део обода контурне површине модела)



Слика 3.6 – SolidWorks (доњи део обода контурне површине модела)



Слика 3.7 – SolidWorks (употреба Surface-Knit команде)

Surface-Knit команда обједињује све добијене површине у једну. Затим команда Shell да би се добила љуска са жељеним обликом тела робота.



Слика 3.8 – SolidWorks (изглед тела робота после коришћења Shell команде)

res Sketch Weldments Evaluate	DimX	(pert Office Products Simulation Surfaces O C) 💥 🖪 🐴 - 🗇 - 🚱 - 🚳 -	- 月父
	^	Plane4	
Extrude5 ?		→	×
🖌 🗙 65		学 3DSketch5	× <u> </u>
Tool and the second sec		一些 3DSketch6	<u>81</u>
<u>From</u> ×		Soundary-Surface1	
Sketch Plane			
Direction 1		🚸 Boundary-Surface6	2
👌 Blind 👻		Boundary-Surface? Top Plane Front Plane	<u></u>
7		- Boundary-Surface9	<u> </u>
		🗄 🚸 Boundary-Surface11	
15.00mm	4	Boundary-Surface12	
7 Marga result	j.	Boundary-Surface14	
		Soundary-Surface15	
■ •		Boundary-Surface16	
Draft outward	Е	Boundary-Surface1/	
Direction 2 ×		Surface-Plane1	
Felerted Contours		Surface-Plane3	
Selected Contours	8	1 Surface-Knit2	
		E Shell3	
		C (·) Sketch14	
		Plane6	
		Extrude5	
		Light Plane8	

Слика 3.9 – SolidWorks (коришћење Extrude команде за конструисање кућишта ротора)



Слика 3.10 – SolidWorks

(употреба Extrude за прављење отвора на кућишту ротора и лежишта за сензорске антене)



Слика 3.11 – SolidWorks (коришћење Extrude команде од скице на помоћној Равни 7)



Слика 3.12 – SolidWorks (коришћење Fillet команде)

Као што се на слици 3.12 види Fillet команду сам користио за повећање радијуса прелазног заобљења како бих смањио концентрацију напона на конзолном носачу ноге робота.



Слика 3.13 – SolidWorks (употреба Chamfer команде за обарање ивица)

Обарање ивица се врши због лакше монтаже поклопца робота.



Слика 3.14 – SolidWorks (изглед завршеног тела робота)

3.2 Дизајнирање погонског ротора са ексцентром

За моделирање ове компоненте су коришћене већ виђене команде уз додатак Cut Revolve команде програма.



Слика 3.15 – SolidWorks (употреба Revolve Cut команде)



Слика 3.16 – SolidWorks (изглед готовог ротора са ексцентром)



3.3 Дизајнирање ноге робота

Слика 3.17 – SolidWorks (скица са димензијама ноге робота и Extrude команде)



Слика 3.18 – SolidWorks (детаљи приликом дизајнирања ноге робота)



Слика 3.19 – SolidWorks (изглед завршене ноге робота)

3.4 Дизајнирање контактне сензорске антене



Слика 3.20 – SolidWorks (употреба Helix Spiral и Sweep команде за конструисање завојне опруге)



Слика 3.21 – SolidWorks (скица врха антене и Sweep команда за њено конструисање)



Слика 3.22 – SolidWorks - конструисање другог контакта прекидача сензора – зелени цилиндар



Слика 3.23 – SolidWorks (изглед завршене сензорске антене)

3.5 Дизајнирање полуге механизма робота



Слика 3.24 – SolidWorks (дизајн полуге механизма робота)



Слика 3.25 – SolidWorks (изглед завршене полуге механизма робота)

3.6 Дизајнирање поклопца робота



Слика 3.26 – SolidWorks (скица и Extrude команда)



Слика 3.27 – SolidWorks (изглед завршеног поклопца робота)

3.7 Дизајнирање осигурача у механизму робота

res Sketch Weldments Evalua	ate DimXpert Office Products Simulation Surfaces 🤄 🍳 🔍 💸 🗐 🛱 - 🗇 - 🛷 - 👁 🛔	es Sketch Weldments Evaluate DimXpert Office Products Simulation Surfaces 🛛 🔍 🔍 🤫 🕅 🗗
	n 🌾 Pin	<u>♥ ㎡ № ↔</u> * [≫] Pm
V X		Waterrietz
Selections A		From
Right Plane		Sketch Plane
		Direction 1 A
Through Lines/Points		Blind -
Parallel Plane at Point		
90.00deg \$	Right Flane	↓ 1.00mm ÷ 1
10.00mm 🛟 🚺		
Reverse direction		
Normal to Curve	$\langle \cdot \rangle$	Draft outward
On Surface		Direction 2 ×
		Selected Contours 😵
	X	×
1	z 🛁	z 🛁

Слика 3.28 – SolidWorks (конструкција помоћне равни и главе осигурача)



Слика 3.27 – SolidWorks (изглед завршеног осигурача)

3.8 Креирање склопа робота

Прави се нови SolidWorks документ, овом приликом уместо Template Part бира се Template Assembly и у њега се уносе све појединачне компоненте које су до сада направљене. Уколико је потребно више истих компоненти онда се свака та појединачна компонента уноси онај број пута колико је неопходно да се склоп комплетира.



Слика 3.28 – SolidWorks (унос компоненти у нови машински склоп робота)

Да би смо одредили тачну позицију појединачних компоненти једне у односу на другу и њихов међусобни однос користи се команда Mate.



Слика 3.29 – SolidWorks (употреба команде Mate - Concentric за дефинисање међусобног положаја отвора у конзолном носачу тела и ноге робота)



Слика 3.30 – SolidWorks (употреба команде Mate - Coincident за дефинисање међусобног положаја контактних површина конзолног носача и ноге робота)



Слика 3.31 – SolidWorks (положај ноге робота и конзолног носача након комбинације Mate - Concentric – Coincident команде)



Слика 3.32 – SolidWorks (ротација унесене компоненте по осама)



Слика 3.33 – SolidWorks (све компоненте механизма робота)



Слика 3.34 – SolidWorks (коначан изглед завршеног робота)

3.9 Креирање анимације механизма

Уз помоћ овог програмског пакета сам реализовао анимацију механизма како бих проверио исправност веза између сваке од компоненти. Могуће је урадити и симулацију кретања робота по подлози уз укључивање и гравитације. Односно тежине и трења у додиру са подлогом. Ово значи да би могло да се види да ли добијени механизам производи потребан редослед покретања ногу који би омогућио кретање читавог робота. Међутим како је механизам комплексан а поготово то што има доста конкавних површина реализација те симулације би предуго трајала на хардверу који је у овом тренутку био на располагању, па се од те намере одустало.



Слика 3.35 – SolidWorks (Motion Study – timeline - анимације механизма робота)

4. Матлаб



Слика 4.1 – Matlab - интро

Природа је за дизајнирање милиона врста живих бића имала милионе година. Они покушаји у дизајну који нису били успешни данас се налазе у археолошким музејима као изумрле врсте. Да би се показало да неки дизајн јесте или није успешан природа има време – много времена са наше тачке гледишта и практично неограничене ресурсе – ништа се не баца захваљујући рециклирању. Све функционише по принципу "покушај – грешка". Дакле малом променом на постојећем дизајну живог бића и његовим постављањем у животно окружење се проверава да ли је дизајн добар уз незаобилазну компоненту времена и потрошених ресурса за његово стварање. То је модел по којем еволуција живота функционише.

Оно што инжењери покушавају да постигну приликом дизајнирања машине која ће бити инспирисана природом је да покушају да схвате принципе до којих је природа дошла кроз велики број итерација животних циклуса сваког живог бића. Може се догодити да конструктор није добро схватио принцип или га је добро схватио али га није добро применио. И у једном и у другом случају резултат ће бити лоше дизајниран производ. Потребно је да пронађемо начин да пре него што кренемо у израду прототипа испитамо квалитет нашег дизајна и да оно што није добро на време исправимо. Да би смо смањили време које нам је потребно од идејног решења до готовог производа у процесу дизајнирања пре него што направимо прототип потребно је поред визуелизације модела што се ради у САД програмима урадити и комплетну анализу механизама којег смо пројектовали. Захваљујући сарадњи између компанија које производе CAD софтвер у овом случају SolidWorks и математичког софтвера у овом случају MathWorks – Matlab дошло је до стварања моћног алата за инжењере дизајнере. SimMechanics омогућава да се машински склоп израђен у SolidWorks 3D CAD програму увезе у Matlab. На тај начин се сада 3D модел може симулирати у Simulink окружењу где се могу анализирати силе и обртне моменте у механичким зглобовима, затим креирати дијаграми убрзања и померања сваке компоненте у посматраном механичком систему. Оно што иначе није карактеристично за математичке програме је могућност визуелног представљања кретања посматраног машинског склопа.

Симулацијом механичких, управљачких и осталих динамичких система се постиже већи квалитет дизајнираних машинских склопова а такође се штеди се на времену и ресурсима потребним да се до њих дође.

Наредни корак у пројекту мини-робота са шест ногу је формирање тог математичког модела. За то нам је потребно да познајемо све физичко геометријске карактеристике појединих компоненти као и њихове везе са осталим деловима механизма робота.

Оно што нам је неопходно да знамо како би смо дефинисали сваку појединачну компоненту као круто тело у математичком моделу робота је : његова маса - m, тензор инерције - I, и положај ЦМ- центра масе, тј. (CG - center of gravity) његове координате) као и правце и смерове оса које кроз њега пролазе. Такође нам морају бити дефинисани и почетни положаји сваке компоненте механизма као и њихове везе са осталим деловима робота.

При томе:

Тензор инерције тј. тензор момента инерције издуженог крутог тела нам даје на основу расподеле масе по попречном пресеку тела и задате вредности обртног момента вредност угаоног убрзања.

Ако је V запремина а $\rho(r)$ густина масе тела функција вектора положаја r унутар тела. Онда се појединачне компоненте тензора инерције I добијају на основу израза :

$$I_{ij} = \int_{V} dV \left[\delta_{ij} \left| r \right|^2 - r_i r_j \right] \rho(r)$$
(4.1) [4]

Индекси i, j могу имати вредности 1, 2, 3, или x, y, z. Овај тензор је реална, симетрична 3x3 матрица или еквивалентни MATLAB израз.

Тензори инерције тела у SimMechanics модулу Matlab програма се увек рачунају за координатни систем центра масе тог тела и током симулације су фиксирани за њега - не мењају се.

Убрзање које тело добија пропорционално је сили која га изазива, поклапа се са њом по правцу и смеру а обрнуто је пропорционално маси тела.

Ако је V запремина тела и $\rho(r)$ густина масе која зависи од положаја r унутар тог тела. Онда је маса m:

$$m = \int_{V} dV \rho(r) \tag{4.2} [4]$$

ΣS About MATLAB R2009a The Language of Technical Computing About Simulink Version 7.8.0.347 (R2009a) R2009a 32-bit (win32) February 12, 2009 License Number: 161051 Dynamic System Simulation for MATLAB® Version 7.3 (R2009a) January 15, 2009 Copyright 1984-2009, The MathWorks, Inc. Protected by U.S. patents. See www.mathworks.com/patents. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See www.mathworks.com/trademarks for a list of additional trademarks. Other product or brand names may be trademarks or reg trademarks of their respective holders. Copyright 1990-2009, The MathWorks, Inc ed by U.S. patents. See www.mathworks.com/patents The MathWorks™ The MathWorks™

4.1 Структура програма и процеса креирања математичког модела робота у Матлабу

Слика 4.2 – Matlab и Simulink - верзије програма које су коришћене у раду

SimMechanics софтвер је базиран на Simscape[™] софтверу. То је платформа која је део Simulink Physical Modeling фамилије и обухвата моделирање и дизајнирање система на бази основних закона који важе у физици . Simscape софтвер ради унутар Simulink окружења и прилагођен је лакој комуникацији са осталим Simulink компонентама и Matlabom.

У даљем тексту је описана структура софтвера који је коришћен у изради математичког модела механизма робота. На слици 4.3 се види да се за креирање XML фајла од готовог 3D модела машинског склопа користи SimMechanic Link додатак који се инсталира у SolidWorks и који у ствари представља спону између програма за 3D моделирање и математичког софтвера.



Слика 4.3 Од 3D CAD модела до XML фајла за физичко моделирање

На слици 4.3 се види да се приликом креирања XML фајла за моделирање креирају и STL фајлови који су неопходни за визуелну презентацију модела у симулацији механизма робота.



Слика 4.4

Од XML физичког модела ка SimMechanic математичком моделу механизма робота

На слици 4.4 се види структура програма за креирање визуелног математичког модела механизма робота и поступак који потребан за његово добијање.



Слика 4.5 – SolidWorks (све компоненте механизма робота)
За сваку компоненту механизма је потребно дефинисати његове физичко геометријске карактеристике. Такође и њихове релативне позиције и орјентације у простору као и њихове везе. Када прикупимо све потребне податке морамо их у одређеној форми унети у MATLAB[®]. За ту намену се креира XML фајл.

Рачунање свих ових података и писање кода могуће је радити ручно што је мукотрпан посао у којем се често могу појавити грешке. Захваљујући савременом софтверу можемо убрзати читав поступак.

XML фајл је постоји и електронској форми под називом Assem1.xml и приложен је уз рад. Делови кода се могу видети у даљем тексту. У овом фајлу требају да се налазе све оне информације које сам до сада навео да су неопходне уз додатак дефинисања свих веза између компоненти механизма.

У даљем тексту ћу навести примере XML кода за само неке од компоненти механизма робота.

За стварање XML и STL фајлова је потребно у SolidWorks инсталирати SimMechanic Link (Add-In) додатак.

Add-Ins		x
Active Add-ins	Start Up	*
eDrawings 2009		
🗖 🚰 FeatureWorks		
🗆 🗖 🏹 PhotoWorks		
🔽 🍘 ScanTo3D		
🗌 🗌 🖉 SolidWorks Design Checker		
🔽 🤗 SolidWorks Motion	✓	
🗌 🔚 🛅 SolidWorks Routing		
🔽 🚺 SolidWorks Simulation	✓	
SolidWorks Toolbox		
🔲 🍸 SolidWorks Toolbox Browser		
🔽 🛺 SolidWorks Utilities		
TolAnalyst		=
SolidWorks Add-ins		
Autotrace		
SolidWorks 2D Emulator		
SolidWorks MTS		
SolidWorks XPS Driver		
Other Add-ins		
Collada Export Addin		
SimMechanics Link		
		Ŧ
OK Cancel		//.

Слика 4.6 – SolidWorks активација (SimMechanic Link) додатка

4.2 3D модел осигурача механизма робота (Pin-4)

Након тога је потребно генерисати тај фајл као и пропратне STL фајлове. STL фајлови нам служе да визуелно прикажемо 3D модел објекта у прозору за симулацију у Matlab програму. Анализа механизма може да се врши и без визуелизације.



Слика 4.7 – SolidWorks 3D модел осигурача механизма робота (Pin-4)



Слика 4.8 – STL фајл 3D модела осигурача механизма робота (Pin-4)

Назив величине	Вредност
Запремина	2.91468e-008 (m ³)
Густина	1000 (kg/m^3)
Површина	7.33569e-005 (m ²)
Maca	2.91468е-005 (кg)
Тензор инерције и	□ 1.49228e - 011 0 0 □
	$I = \begin{bmatrix} 0 & 3.48786e - 010 & 0 \\ (kg \cdot m^2) & \end{bmatrix}$
главни моменти инерције v пентру масе	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 3.48786e - 010 \end{bmatrix}$
	$I_x = 1.49228e - 011, I_y = 3.48786e - 010,$
	$I_z = 3.48786e - 010 \ (kg^*m^2)$

Табела 4.1 – Физичко геометријске карактеристике осигурача механизма робота (Pin-4)

У даљем тексту се налази део кода XML фајла који се односи на дефинисање карактеристика креираног 3D модела осигурача (Pin-4) као и на дефинисање свих веза са осталим компонентама механизма робота :

<Body>

<name>"Pin-4"</name> <nodeID>"Pin-4"</nodeID> <status>""</status> <mass>2.91468e-005</mass> <massUnits>"kg"</massUnits> <inertia>1.49228e-011,0,0,0,3.48786e-010,0,0,0,3.48786e-010</inertia> <inertiaUnits>"kg*m^2"</inertiaUnits> <volume>2.91468e-008</volume> <volumeUnits>"m^3"</volumeUnits> <surfaceArea>7.33569e-005</surfaceArea> <surfaceAreaUnits>"m^2"</surfaceAreaUnits> <frames> <Frame> <name>"CG"</name> <nodeID>"Pin-4::CG(AUTOGEN)"</nodeID> <position>-0.018856,-0.00159025,0.00164169/position> <positionOrigin>"WORLD"</positionOrigin> <positionReferenceFrame>''WORLD''</positionReferenceFrame> <positionUnits>"m"</positionUnits> <orientation>-1,0,0,0,0.116249,-0.99322,0,-0.99322,-0.116249</orientation> <orientationType>"3x3 Transform"/orientationType> <orientationUnits>"rad"</orientationUnits> <orientationReferenceFrame>"WORLD"/orientationReferenceFrame> </Frame> <Frame> <name>"CS1"</name> <nodeID>"Pin-4::CS1(AUTOGEN)"</nodeID> <position>-0.0126351,-0.00159025,0.00164169 <positionOrigin>"WORLD"</positionOrigin> <positionReferenceFrame>''WORLD''</positionReferenceFrame> <positionUnits>"m"</positionUnits> <orientation>-1,0,0,0,0.116249,-0.99322,0,-0.99322,-0.116249</orientation> <orientationType>"3x3 Transform"</orientationType> <orientationUnits>"rad"</orientationUnits> <orientationReferenceFrame>"WORLD"</orientationReferenceFrame> </Frame> <Frame ref="12"> <name>"CS2"</name> <nodeID>"Eccentric shaft-2:-:Pin-4::Pin-4(AUTOGEN)"</nodeID> <position>-0.00813511,-0.00159025,0.00164169</position> <positionOrigin>"WORLD"/positionOrigin> <positionReferenceFrame>"WORLD"</positionReferenceFrame> <positionUnits>"m"</positionUnits> <orientation>1,0,0,0,1,0,0,0,1/orientation> <orientationType>"3x3 Transform"</orientationType> <orientationUnits>"rad"</orientationUnits> <orientationReferenceFrame>"WORLD"</orientationReferenceFrame> </Frame> <Frame ref="13"> <name>"CS3"</name> <nodeID>"Leg 2 -2:-:Pin-4::Pin-4(AUTOGEN)"</nodeID> <position>-0.0226351.-0.00159025.0.00164169/position> <positionOrigin>"WORLD"</positionOrigin> <positionReferenceFrame>''WORLD''</positionReferenceFrame> <positionUnits>"m"</positionUnits>

```
<orientation>1,0,0,0,1,0,0,0,1</orientation>
   <orientationType>"3x3 Transform"</orientationType>
<orientationUnits>"rad"</orientationUnits>
   <orientationReferenceFrame>"WORLD"/orientationReferenceFrame>
  </Frame>
 </frames>
 <geometryFileName>"Assem1 - Pin-4.STL"</geometryFileName>
 <MaterialProp>
  <color>0.639216,0.6666667,0.678431</color>
  <ambient>1</ambient>
  <diffuse>1</diffuse>
  <specular>0.7</specular>
  <shininess>0.3</shininess>
  <transparency>0</transparency>
  <emission>0.08</emission>
 </MaterialProp>
</Body>
```

4.3 3D модел ротора-2 робота (Eccentric shaft-2)



Слика 4.9 – SolidWorks 3D модел ротора-2 робота (Eccentric shaft-2)



Слика 4.10 STL фајл 3D модела ротора-2 робота (Eccentric shaft-2)

Назив величине	Вредност					
Запремина	2.01093e-007 (<i>m</i> ³)					
Густина	1000 (kg/m ³)					
Површина	0.00029326 (m ²)					
Maca	0.000201093 (kg)					
Тензор инерције ротора са	$\begin{bmatrix} 6.67147e - 010 & 0 & 4.15464e - 012 \end{bmatrix}$					
ексцентром	0 0,2.56235e-009 0 $(kg \cdot m^2)$					
	$\begin{bmatrix} 4.15464e - 012 & 0 & 2.57819e - 009 \end{bmatrix}$					

Табела 4.2 – Физичко геометријске карактеристике ротора-2 (Eccentric shaft-2)

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no" ?> <PhysicalModelingXMLFile>

<formatVersion>"1.0.4"</formatVersion>

<internalVersion>1</internalVersion>

<createdUsing>"SimMechanics Link Version 3.1"</createdUsing>

<createdFrom>"SolidWorks 17.4.0"</createdFrom>

<createdOn>"10/13/10||05:33:14"</createdOn>

<createdBy>"No formal user defined!"</createdBy>

<name>"Assem1"</name>

```
<SimMechanics>
  <name>"Assem1"</name>
  <nodeID>"Assem1"</nodeID>
  <bodies>
<name>''Eccentric shaft-2''</name>
    <nodeID>"Eccentric shaft-2"</nodeID>
    <status>''''</status>
    <mass>0.000201093</mass>
    <massUnits>"kg"</massUnits>
    <inertia>6.67147e-010,0,4.15464e-012,0,2.56235e-009,0,4.15464e-012,0,2.57819e-009</inertia>
    <inertiaUnits>''kg*m^2''</inertiaUnits>
    <volume>2.01093e-007</volume>
    <volumeUnits>"m^3"</volumeUnits>
    <surfaceArea>0.00029326</surfaceArea>
    <surfaceAreaUnits>"m^2"</surfaceAreaUnits>
    <frames>
     <Frame>
      <name>"CG"</name>
      <nodeID>"Eccentric shaft-2::CG(AUTOGEN)"</nodeID>
      <position>-0.008973,-0.000197446,0.00183383
      <positionOrigin>"WORLD"</positionOrigin>
      <positionReferenceFrame>''WORLD''</positionReferenceFrame>
      <positionUnits>"m"</positionUnits>
      <orientation>-1,0,0,0,-0.136657,0.990618,0,0.990618,0.136657</orientation>
      <orientationType>"3x3 Transform"</orientationType>
      <orientationUnits>"rad"</orientationUnits>
      <orientationReferenceFrame>"WORLD"</orientationReferenceFrame>
```

</Frame> <Frame> <name>"CS1"</name> <nodeID>"Eccentric shaft-2::CS1(AUTOGEN)"</nodeID> <position>-0.00313511,-0.000252915,0.00182618/position> <positionOrigin>"WORLD"</positionOrigin> <positionReferenceFrame>''WORLD''</positionReferenceFrame> <positionUnits>"m"</positionUnits> <orientation>-1,0,0,0,-0.136657,0.990618,0,0.990618,0.136657</orientation> <orientationType>"3x3 Transform"</orientationType> <orientationUnits>"rad"</orientationUnits> <orientationReferenceFrame>"WORLD"</orientationReferenceFrame> </Frame> <Frame ref="11"> <name>"CS2"</name> <nodeID>"Eccentric shaft-2:-:Pin-4::Eccentric shaft-2(AUTOGEN)"</nodeID> <position>-0.00813511,-0.00159025,0.00164169</position> <positionOrigin>"WORLD"/positionOrigin> <positionReferenceFrame>''WORLD''</positionReferenceFrame> <positionUnits>"m"</positionUnits> <orientation>1,0,0,0,1,0,0,0,1/orientation> <orientationType>"3x3 Transform"/orientationType> <orientationUnits>"rad"/orientationUnits> <orientationReferenceFrame>"WORLD"</orientationReferenceFrame> </Frame> <Frame ref="22"> <name>"CS3"</name> <nodeID>"Body-1:-:Eccentric shaft-2::Eccentric shaft-2(AUTOGEN)"</nodeID> <position>0.00186489,-0.000252915,0.00182618</position> <positionOrigin>"WORLD"</positionOrigin> <positionReferenceFrame>''WORLD''</positionReferenceFrame> <positionUnits>"m"</positionUnits> <orientation>1,0,0,0,1,0,0,0,1</orientation> <orientationType>"3x3 Transform"</orientationType> <orientationUnits>"rad"</orientationUnits> <orientationReferenceFrame>"WORLD"</orientationReferenceFrame> </Frame> <Frame ref="23"> <name>"CS4"</name> <nodeID>"Eccentric shaft-2:-:Rod 1-2::Eccentric shaft-2(AUTOGEN)"</nodeID> <position>-0.00813511,-0.00159025,0.00164169</position> <positionOrigin>"WORLD"</positionOrigin> <positionReferenceFrame>''WORLD''</positionReferenceFrame> <positionUnits>"m"</positionUnits> <orientation>1,0,0,0,1,0,0,0,1</orientation> <orientationType>"3x3 Transform"</orientationType>
<orientationUnits>"rad"</orientationUnits> <orientationReferenceFrame>"WORLD"</orientationReferenceFrame> </Frame> <Frame ref="25"> <name>"CS5"</name> <nodeID>"Eccentric shaft-2:-:Rod 1-3::Eccentric shaft-2(AUTOGEN)"</nodeID> <position>-0.00813511,-0.00159025,0.00164169</position> <positionOrigin>"WORLD"</positionOrigin> <positionReferenceFrame>''WORLD''</positionReferenceFrame> <positionUnits>"m"</positionUnits> <orientation>1,0,0,0,1,0,0,0,1</orientation> <orientationType>"3x3 Transform"/orientationType> <orientationUnits>"rad"/orientationUnits> <orientationReferenceFrame>"WORLD"</orientationReferenceFrame>

</Frame>

<Frame ref="27"> <name>"CS6"</name> <nodeID>"Eccentric shaft-2:-:Leg_2_-2::Eccentric shaft-2(AUTOGEN)"</nodeID> <position>-0.00813511,-0.00159025,0.00164169/position> <positionOrigin>"WORLD"</positionOrigin>
<positionReferenceFrame>"WORLD"</positionReferenceFrame> cypositionUnits>"m"/positionUnits>
<orientation>1,0,0,0,1,0,0,0,1/orientation> <orientationType>''3x3 Transform''</orientationType> <orientationUnits>"rad"</orientationUnits> <orientationReferenceFrame>"WORLD"/orientationReferenceFrame> </Frame> </frames> <geometryFileName>"Assem1 - Eccentric shaft-2.STL"</geometryFileName> <MaterialProp> <color>1,1,1,1</color> <ambient>1</ambient> <diffuse>1</diffuse> <specular>0.5</specular> <shininess>0.4</shininess> <transparency>0</transparency> <emission>0.08</emission> </MaterialProp> </Body> <Body>

4.4 3D модел полуге механизма робота (Rod_1-3)



Слика 4.11 – SolidWorks 3D модел полуге механизма робота (Rod_1-3)



Слика 4.12 – STL фајл 3D модела полуге механизма робота (Rod_1-3)

Назив величине	Bpe	дност				
Запремина	9.11	9.11134e-008 (m ³)				
Густина	1000) (kg	$/\mathrm{m}^3$)			
Површина	0.00	$0201081 \ (m^2)$				
Maca	9.11	134е-005 (кg)				
Тензор инерције и		1.08466e-010	0	0 -		
	<i>I</i> =	0	2.41634e-009	0	$(kg \cdot m^2)$	
главни моменти инерције у центру масе		0	0	2.46407e-009		
y don't py mice	$I_x = 1.08466e-010, I_y = 2.41634e-009,$					
	$I_z =$	= 2.46407e-009	$(kg \bullet m^2)$			

Табела 4.3 – Физичко геометријске карактеристике полуге механизма робота (Rod_1-3)

4.4 3D модел ноге робота (Leg_2_-2)



Слика 4.13 – SolidWorks 3D модел ноге робота (Leg_2_-2)



Слика 4.14 – STL фајл *3D* модела ноге робота (Leg_2_-2)

Назив величине	Вредност					
Запремина	1.70479e-007 (m ³)					
Густина	1000 (kg/m^3)					
Површина	0.000390858 (m ²)					
Maca	0.000170479 (кg)					
Тензор инерције	[1.13837e-008 4.69223e-009 -1.31189e-013]					
	$I = \begin{vmatrix} 4.69223 \text{e}-009 & 2.66089 \text{e}-009 & 5.16077 \text{e}-013 \end{vmatrix} (kg \cdot m^2)$					
	-1.31189e-013 5.16077e-013 1.36285e-008					

Табела 4.4 – Физичко геометријске карактеристике ноге робота (Leg_2_-2)

4.5 3D модел сензорске антене (Sensor_right-1)



Слика 4.15 – SolidWorks 3D модел сензорске антене (Sensor_right-1)



Слика 4.16 – STL фајл 3D модела сензорске антене (Sensor_right-1)

Назив величине	Вредност						
Запремина	1.90292e-008 (m ³)						
Густина	1000 (kg/m ³)						
Површина	0.000190644 (m ²)						
Maca	1.90292е-005 (кg)						
Тензор инерције	[4.01738e-010 2.60614e-010 2.08916e-011]						
	$I = \begin{vmatrix} 2.60614 \text{e-}010 & 2.77669 \text{e-}010 & -2.48899 \text{e-}011 \\ (kg \cdot m^2) \end{vmatrix}$						
	2.08916e-011 -2.48899e-011 6.53726e-010						
	-						

Табела 4.5 – Физичко геометријске карактеристике сензорске антене (Sensor_right-1)

4.6 3D модел поклопца робота (Cover-final-1)



Слика 4.17 – SolidWorks 3D модел поклопца робота (Cover-final-1)



Слика 4.18 – STL фајл 3D модела поклопца робота (Cover-final-1)

Назив величине	Вредност						
Запремина	1.8741e-006 (m ³)						
Густина	1000 (kg/m^3)						
Површина	0.00243393 (m ²)						
Maca	0.0018741 (кg)						
Тензор инерције	[2.36724e-007 1.97202e-016 -3.51087e-011]						
	$I = \begin{vmatrix} 1.97202e-016 & 3.74699e-007 & 0 & (kg \cdot m^2) \end{vmatrix}$						
	-3.51087e-011 0 1.39225e-007						

Табела 4.6 – Физичко геометријске карактеристике поклопца робота (Cover-final-1)

4.7 3D модел тела робота (Body-1)



Слика 4.19 – SolidWorks 3D модел тела робота (Body-1)



Слика 4.20 – STL фајл 3D модела тела робота (Body-1)

Назив величине	Вредност						
Запремина	5.20666e-006 (m ³)						
Густина	1000 (kg/m^3)						
Површина	0.00571725 (m ²)						
Maca	0.00520666 (кg)						
Тензор инерције	7.75976e-007 -1.1148e-011 -8.98923e-012						
	$I = \begin{vmatrix} -1.1148e-011 & 8.04147e-007 & 1.5294e-008 \end{vmatrix} (kg \cdot m^2)$						
	-8.98923e-012 1.5294e-008 3.99411e-007						

Табела 4.7 – Физичко геометријске карактеристике тела робота (Body-1)

4.8 Генерисање блок дијаграма математичког модела робота

А затим на основу XML и STL фајлова из Matlab програма генеришемо блок дијаграм математичког модела читавог механизма робота. Отварањем "Assem1.mdl" фајла добија се Simulink прозор са блок дијаграмом математичког модела робота.



Слика 4.21– SimMechanic – Simulink прозор са блок дијаграмом математичког модела робота

Како је дијаграм математичког модела робота комплексан слика 4.21 је постављена само као прелиминарни преглед прилога 1. У прилогу 1 се могу видети сви блокови и њихове међусобне везе. Може се приметити да постоје различити типови блокова у блок дијаграму. Блокови су графичка репрезентација за додатне опције које можемо уградити и математички модел механизма робота засноване на потребама које се могу јавити при дизајнирању реалног робота или било којег другог мехатроничког система. У Симулинку постоји читав спектар различитих библиотека којима се може повезати механика са хидрауликом, аеродинамиком, електроником, обрадом сигнала, аутоматским управљањем, адаптивном оптимизацијом, вештачким неуронским мрежама, 3D анимацијом, виртуелном реалношћу итд.

Блокови који су овом приликом коришћени припадају Simscape - SimMechanics библиотеци и се могу поделити у више основних категорија и то :

- Bodies (Тела). Садржи блокове потребне за описивање физичких крутих тела у простору
- Joints (Везе). Представља блокове којима се дефинишу степени слобода тих крутих тела и њихово релативно кретање.
- Sensors and Actuators (Сензори и актуатори). Садржи блокове којима се иницира и мери кретање.
- Sinks (Прикупљање и приказивање) Представља блокове за приказивање тока сигнала добијених са сензора.

Основне компоненте сваке машине су крута тела. У SimMechanics модулу појам тело се односи на било који просторни објекат који има масу. SimMechanics тела за разлику од физичких немају степене слободе. У SimMechanics библиотеци тела постоје два основна блока за њихово представљање у Simulink моделима :

• Ground

Чиме се моделира тело бесконачне масе и бесконачних димензија и које нам служи као референтни систем и као фиксна тачка на коју везујемо остале компоненте система, на пример под фабрике по којем се робот треба да се креће.

• Body

Чиме се моделира круто тело коначне масе и димензија укључујући и њихов координатни систем у њиховом центру масе.

Моделирање "Земље" – тела које има бесконачну велику масу и димензије и за које се везује непокретни (референтни) координатни систем из којег све посматрамо се врши тако што се између нашег система тела робота и Ground блока постави одговарајући Joint блок, блок са одговарајућим степеном слободе. На тај начин одређујемо број степени слободе које наш систем има у односу на окружење.



Слика 4.21– SimMechanic – Simulink главни унутрашњи(Ground) и референтни координатни систем (World) - пример

У SimMechanic – Simulink моделима постоји главни унутрашњи(Ground) и референтни координатни систем (World). Осе и једног и другог координатног система су паралелне. Ове особине програма нам омогућавају да у моделу уз помоћ (GND CS) координата можемо дефинисати почетне позиције сваког дела механизма у односу на окружење (оно одакле ми посматрамо читав модел).



Слика 4.22– SimMechanic – Simulink део блок дијаграма из прилога 1 математичког модела робота са размештеним компонентама због лакше прегледности

На слици 4.22 се види део блока дијаграма математичог модела робота и начин на који су повезани блокови који одређују позицију читавог механизма робота у виртуелном простору као и начин на који је тај простор дефинисан.

4.9 Machine Environment (Env) блок



4.23–Machine Environment (Env) блок припада (Simscape – SimMechanics – Bodies библиотеци) а део је блок дијаграма математичког модела робота којим се дефинише његово окружење у симулацији

당 Block Paramete	rs: Machin	e Environment		×				
Description	Description							
Defines the mechanical simulation environment for the machine to which the block is connected: gravity, dimensionality, analysis mode, constraint solver type, tolerances, linearization, and visualization.								
Parameters Co	onstraints	Linearization	Visualization					
Analysis mode: Ty Tolerances: Maxim	pe of soluti num permiss	on for machine's m sible misalignment o	otion. of machine's joints.					
Gravity vector:		[0 -9.81 0]		m/s^2 →				
🔲 Input gravity a	s signal							
Machine dimensiona	ality:	Auto-detect		•				
Analysis mode:		Forward dynamics		•				
Linear assembly tole	erance:	1e-3		m 🔹				
Angular assembly to	olerance:	1e-3		rad 👻				
Configuration Parameters								
OK Cancel Help Apply								

Слика 4.23.1-Machine Environment (Env) блок - параметри

Machine Environment је блок окружења машинског склопа и њиме се дефинише:

- вектор силе земљине теже,
- да ли се склоп налази у 2D ili 3D простору,
- врста анализе (у овом случају (Forward dynamics) за задате силе, обртне моменте и почетне положаје тражимо брзине, убрзања и позиције тела у простору),
- начин на који ће се везе бити решаване у смислу степена толеранција које смо изабрали као и
- како ће се вршити визуелно представљање дате симулације математичког модела робота

4.10 Ground блок



4.24–Ground блок припада (Simscape – SimMechanics – Bodies библиотеци) а део је блок дијаграма математичког модела робота којим се дефинише непокретна тачка у World референтном систему

🙀 Block Paramete	rs: RootGround										
Ground Grounds one side of a Joint to a fixed location in the World coordinate system.											
Parameters	Parameters										
Location [x,y,z]:	[-0.00313882,0.00213683,0.00257927] m 💌										
Show Machine Environment port											
	OK Cancel Help Apply										

Слика 4.24.1 – Ground блок - параметри

Када се са једне стране налази у контакту са блоком који означава везу (Joint) у тој тачки додира спречава свако његово кретање. На тај начин се дефинише и позиција у односу на референтни координатни систем World. Сваки модел у SimMechanics окружењу мора да има барем један Ground блок.

4.11 Weld блок



Слика 4.25–Weld блок припада (Simscape – SimMechanics – Joints библиотеци) а део је блок дијаграма математичког модела робота којим се дефинише зглобна веза која нема ни један степен слободе

🙀 Block Pa	arameters: Weld2	2	×						
Weld	Weld								
Represents zero degrees of freedom. Rigidly connects the base (B) and follower (F) Bodies in initial relative configuration. Sensor ports can be added. Weld joint cannot be actuated.									
Connectio	on parameters								
Current b	ase:	GND@RootGrour	nd						
Current f	ollower:	CS3@RootPart							
Number of Paramete Axes	Number of sensor / actuator ports: 0 Parameters Axes Advanced								
Name	Primitive	Axis of Action [x y z]	Reference CS						
w	weld	[0.57735,0.57735,0.57735]	World 👻						
OK Cancel Help Apply									

Слика 4.25.1–Weld блок - параметри

Може се поставити само између два блока која представљају тела. Када се то уради та два тела су круто повезана без било какве могућности релативног кретања. Weld – Заварени спој.

4.12 Body блок



Слика **4.26** – **Body** блок – тело припада (Simscape – SimMechanics – Bodies библиотеци) а део је блок дијаграма математичког модела робота којим се дефинише круто тело Pin-4

	Block	Paramet	ters	: Pin-4						x	
	Body										
	Represents a user-defined rigid body. Body defined by mass m, inertia tensor I, and coordinate origins and axes for center of gravity (CG) and other user-specified Body coordinate systems. This dialog sets Body initial position and orientation, unless Body and/or connected Joints are actuated separately. This dialog also provides optional settings for customized body geometry and color.										
ſ	Mass pr	operties									
	Mass:	2.914	58e	-005					kg	•	
	Inertia:	[1.492	286	e-011,0,	0;0,3.48786e-010,0;0,0,3.48786e-010]				kg*m^2	•	
Γ	Position	Orie	enta	ation	Visualization						
	Show Port	Port Side		Name	Origin Position Vector [x y z]	Un	its	Translated from Origin of	Compone Axes o	3	
		Right	-	CG	[-0.018856 -0.00159025 0.00164169]	m	•	World 🚽	World		
		Right	-	CS1	[-0.0126351 -0.00159025 0.00164169]	m	-	World 🚽	World		
	V	Left	•	CS2	[-0.00813511 -0.00159025 0.00164169]	m	•	World 🚽	World		
	V	Right	•	CS3	[-0.0226351 -0.00159025 0.00164169]	m	•	World 🗖	World		
	OK Cancel Help Apply										

Слика 4.26.1 – **Body** блок **Pin-4** – параметри

На слици 4.26.1 се виде параметри који су из Табеле 4.1 унети у блок тела осигурача бр.4 (Pin-4) а који је део механизма робота.

Свака физичка компонента механизма се на дијаграму математичког модела робота представља са "Body block" и сваки такав блок представља круто тело чије карактеристике можемо по жељи да мењамо.

Особине тела :

- Маса тела и тензор момента инерције
- Координате центра масе за то тело (center of gravity (CG))
- Једна или више координата у његовом координатном систему (тачке у којима је у додиру са осталим компонентама механизма)

Положај крутог тела је дефинисан у простору ако знамо положај његовог центра масе и његову орјентацију у неком дефинисаном координатном систему.

Bloc Body	k Paramo	eters	:: Pin-4	4 22 4 - 5			1.000		8
Repre other actuat	sents a us user-spec ed separa	ser-d tified ately	lefined ri Body co . This dia	gid body. Body defined by mass m, inertia tensor I, and ordinate systems. This dialog sets Body initial position a alog also provides optional settings for customized body	d coord and ori geom	dina enta etry	te origins and axes for ation, unless Body and/ / and color.	center of gravity (CG) a or connected Joints are	ind
-Mass	properties	s							
Mass:	Mass: 2.91468e-005 kg 🗸								
Inertia	Inertia: [1.49228e-011,0,0;0,3.48786e-010,0;0,0,3.48786e-010] kg*m^2 v								2 🗸
Positi	on Or	ienta	ation	Visualization					
Show Port	Port Side		Name	Orientation Vector	Units	;	Relative CS	Specified Using Convention	
	Right	-	CG	[-100;00.116249-0.99322;0-0.99322-0.116249]	rad		World 👻	3x3 Transform 👻	
	Right	•	CS1	[-100;00.116249-0.99322;0-0.99322-0.116249]	rad	•	World 👻	3x3 Transform 👻	
V	Left		CS2	[100;010;001]	rad	-	World 👻	3x3 Transform 👻	
V	Right	-	CS3	[1 0 0;0 1 0;0 0 1]	rad	-	World 👻	3x3 Transform 👻	
						ОК	Cancel	Help	Apply

Слика 4.26.2 – Pin-4 блок параметри - (orientation tab)

На слици 4.26.2 се види прозор у којем се може подешавати орјентација координатних система тела у односу на остале координатне системе у моделу робота.

Block Parameters: Pin-4							
Body Represents a user-defined rigid body. Body defined by mass m, inertia tensor I, and coordinate origins and axes for center of gravity (CG) and other user-specified Body coordinate systems. This dialog sets Body initial position and orientation, unless Body and/or connected Joints are actuated separately. This dialog also provides optional settings for customized body geometry and color.							
Mass properties							
Mass: 2.91468e-005 kg 👻							
Inertia: [1.49228e-011,0,0;0,3.48786e-010,0;0,0,3.48786e-010] kg*m^2 -							
Position Orientation Visualization							
Body geometry: External graphics file							
Body color: Use color palette 🗸							
External graphics file: Assem1 - Pin-4.STL							
Attached to Body CS: CS1							
OK Cancel Help Apply							

Слика 4.26.3 – Ріп-4 блок - параметри (visualisation tab)

На слици 4.26.3 се види прозор у којем је математички модел блока тела Pin-4 повезан са екстерним графичким фајлом Assem1 - Pin-4.STL и управо та опција нам омогућава визуелно приказивање симулације. И то је оно што овом програмском пакету даје велику употребну вредност. Могућност да видимо шта се дешава са моделом приликом симулације. Позиција осигурача Pin-4 у механизму робота се може видети на слици 4.5 где су посебно означене оне компоненте механизма робота које су у тексту обрађене.

Block	Parame	ters	: Eccent	tric shaft-2				X
Body Represe specified dialog al	Body Represents a user-defined rigid body. Body defined by mass m, inertia tensor I, and coordinate origins and axes for center of gravity (CG) and other user- specified Body coordinate systems. This dialog sets Body initial position and orientation, unless Body and/or connected Joints are actuated separately. This dialog also provides optional settings for customized body geometry and color.							
Mass properties								
Mass: 0.000201093								
Inertia:	Inertia: [6.67147e-010,0,4.15464e-012;0,2.56235e-009,0;4.15464e-012,0,2.57819e-009] [kg*m^2 ↓							
Position	Orie	enta	tion	Visualization				
Show Port	Port Side		Name	Origin Position Vector [x y z]	Units	Translated from Origin of	Components in Axes of	F
	Right	-	CG	[-0.008973 -0.000197446 0.00183383]	m 👻	World 👻	World 👻	
	Right	•	CS1	[-0.00313511 -0.000252915 0.00182618]	(m 🗸	World 👻	World 👻	×
V	Right	-	CS2	[-0.00813511 -0.00159025 0.00164169]	[m 🚽	World 🗸	World 👻	
V	Left	-	CS3	[0.00186489 -0.000252915 0.00182618]	(m 🗸	World 🗸	World 👻	1
v	Right	•	CS4	[-0.00813511 -0.00159025 0.00164169]	[m 🚽	World 👻	World 👻	
V	Right	•	CS5	[-0.00813511 -0.00159025 0.00164169]	m 🔻	World 🗸	World 👻	
V	Right	•	CS6	[-0.00813511 -0.00159025 0.00164169]	m 🗸	World 👻	World 👻	<u> </u>
	Imagine Cancel Help Apply							

Слика 4.26.4 – Eccentric shaft-2 блок – параметри

🙀 Block	Parameters	s: Rod_1	-3				x
Body							
Represents a user-defined rigid body. Body defined by mass m, inertia tensor I, and coordinate origins and axes for center of gravity (CG) and other user-specified Body coordinate systems. This dialog sets Body initial position and orientation, unless Body and/or connected Joints are actuated separately. This dialog also provides optional settings for customized body geometry and color.							
Mass properties							
Mass:	9.11134e	-005				kg	-
Inertia:	[1.08466	e-010,0,0	0;0,2.41634e-009,0;0,0,2.46407e-009]			kg*m^	2 👻
Positio	n Orienta	ation	Visualization				
Show Port	Port Side	Name	Origin Position Vector [x y z]	Units	Translated from Origin of	Components in Axes of	B
	Right 👻	CG	[-0.0191351 0.00285271 0.00717975]	m 👻	World 👻	World 👻	
V	Right 👻	CS1	[-0.0201351 0.00285271 0.00717975]	(m 🗸	World 👻	World 👻	
V	Left 👻	CS2	[-0.00813511 -0.00159025 0.00164169]	(m 👻	World 👻	World 👻	
V	Left 👻	CS3	[-0.0181351 0.00740041 -0.00934958]	(m 🗸	World 👻	World 👻	
V	Right 👻	CS4	[-0.0201351 0.00729568 0.0127178]	(m 👻	World 👻	World 👻	
V	Right 👻	CS5	[-0.0181351 0.00729568 0.0127178]	m 👻	World 👻	World 🗸	
	OK Cancel Help Apply						

Слика 4.26.5 – **Rod_1-3** блок – параметри

Што се тиче геометријских карактеристика тела неопходно је да свако тело има барем један координатни систем (CS) чији ће почетак бити у центру масе (CG) тог тела. Након тога је могуће по потреби додавати произвољан број координатних система за то тело на чије координатне почетке постављамо везе ка другим телима или постављамо контакте са актуаторима и сензорима.

4.13 Cylindrical блок



Слика 4.27-Cylindrical блок припада (Simscape - SimMechanics - Joints) библиотеци

Cylindrical Represents one translational and one rotational degrees of freedom. Restricts the follower (F) to move relative to the base (B) Body along and around a common axis P1- R1. Primitive axes P1 and R1 must be aligned. P1 attached to base. R1 attached to follower. Listed order of primitives is order of motion during simulation. Sensor and actuator ports can be added. Base-follower sequence and axis direction determine sign of forward motion.							
Connection parameters							
Current b	ase:	CS4@Rod_1-	-2				
Current f	ollower:	CS4@Leg_2_	-1				
Parameters Axes Advanced							
Parameter Axes	Advanced						
Parameter Axes Name	Advanced Primitive	Axis of Action [x y z]	Reference CS				
Parameter Axes Name P1	Advanced Primitive prismatic	Axis of Action [x y z] [1,0,0]	Reference CS World 🗸				
Paramete Axes Name P1 R1	Advanced Primitive prismatic revolute	Axis of Action [x y z] [1,0,0] [-1,0,0]	Reference CS World World				

Слика 4.27.1-Cylindrical 11 блок - параметри

Суlindrical блок је део блок дијаграма математичког модела робота и представља комбинацију (два степена слободе), једног транслаторног и једног ротационог кретања делова механизма са паралелним осама транслације и ротације. Њиме се у овом случају за Cylindrical блок под редним бројем 11 у моделу ограничава кретање пратиоца (Leg_2_1) који се повезује на F конектор у односу на вођицу (Rod_1-2) која се повезује на B конектор блока у дијаграму.



Слика 4.27.2– SolidWorks – тела која су везана са Cylindrical 11 блоком у математичком моделу робота

4.14 Planar блок



Слика 4.28-Planar блок припада (Simscape - SimMechanics - Joints) библиотеци

Represents two translational and one rotational degrees of freedom. Restricts the follower (F) to move relative to the base (B) Body in plane defined by span of two primitive primitive primitive primatic axes (P1, P2). follower can also rotate about axis R1 = P1 x P2. Axis R1 must be normal to plane. P1 attached to base. R1 attached to follower. Listed order of primitives is order of motion during simulation. Sensor and actuator ports can be added. Base-follower sequence and axes directions determine sign of forward motion. This joint becomes singular if both prismatics align.								
Connectio	on parameters							
Current b	oase:	CS3@R	od_1-2					
Current f	follower:	CS3@R	od_1-3					
- tomber t	, sensor y detab		Ŭ.					
Paramete	rs							
Paramete Axes	Advanced			D (
Paramete Axes Name	Advanced Primitive prismatic	Axis of Action [x y	z]	Reference CS	_			
Paramete Axes Name P1 P2	Advanced Primitive prismatic prismatic	Axis of Action [x y [0,1,0] [0,0,1]	z]V	Reference CS Vorld Vorld	•			
Paramete Axes Name P1 P2 R1	Advanced Primitive prismatic prismatic revolute	Axis of Action [x y [0,1,0] [0,0,1] [-1,0,0]	z] V V	Reference CS Vorld Vorld Vorld	•			

Слика 4.28.1–Planar блок - параметри

Planar блок је део блок дијаграма математичког модела робота и представља комбинацију (већег броја степена слободе), и то два транслаторна и једно обртно кретање са осом ротације постављеном нормално на раван коју креирају осе транслације. За правилно функционисање модела осе транслације не смеју бити паралелне.



Слика 4.28.2– SolidWorks – тела која су везана Planar4 блоком у математичком моделу

4.15 Revolute блок



Слика 4.29-Revolute блок припада (Simscape - SimMechanics - Joints) библиотеци

oordinat equence	e system origins and axis directio	 Sensor and actuator ports can be on determine sign of forward motion 	e added. Base-follower on by the right-hand rule.
Connecti Current l	on parameters	CS8@Body-1	
Current	follower:	CS3@Eccentric	: shaft-2
Paramete Axes	rs Advanced		
Name	Primitive	Axis of Action [x y z]	Reference CS
	revolute	[-1,0,0]	World 👻
R1			

Слика 4.29.1-Revolute6 блок - параметри

Revolute блок је део блок дијаграма математичког модела робота који представља један степен слободе и то, обртно кретање тела које прати (follower - F) у овом случају ротора са ексцентром (Eccentric shaft-2) у односу на помоћну осу која пролази кроз улежиштење ротора у телу (Body-1) робота. Тело робота (Body-1) представља базу или (base – B) и одговарајући контакт на блоку Revolute 6 у математичком моделу робота.



Слика **4.29.2**– **SolidWorks** – тела која су везана **Revolute6** блоком у математичком моделу робота

Након што се дефинишу све компоненте механизма као и њихове међусобне везе потребно га је покренути. За покретање механизма користимо актуаторе и то ону врсту која се може поставити у сам цилиндрични зглоб којим је ротор са ексцентром везан за базу односно за тело робота. За то је неопходно у модел укључити нови блок из групе сензора и актуатора.



Слика **4.30**– SimMechanic – Simulink део блок дијаграма из прилога 1 математичког модела робота са размештеним компонентама због лакше прегледности

Као што се на слици 4.30 види на Revolute6 блоку је направљен прикључак на који је повезан Joint Actuator1. Оно што је још потребно да би актуатор радио је неки Симулинк сигнал који ће га побуђивати. Овога пута је изабрано да буде нека константна вредност. Та вредност је дефинисана у блоком Constant2.

4.16 Joint Actuator блок



Слика 4.31–Joint Actuator блок припада (Simscape – SimMechanics – Sensors & Actuators) библиотеци

Block Parameters: Joint Actuator1								
Joint Actuator								
Actuates a Joint primitive with generalized force/torque or linear/angular position, velocity, and acceleration motion signals. Base-follower sequence and joint axis determines sign of forward motion. Inputs are Simulink signals. Motion input signals must be bundled into one signal. Connect to Joint block to see Connected to primitive list.								
Actuation								
Connected to primitive: R1								
Actuate with: Generalized Forces								
Applied torque units: N*m 🗸								
OK Cancel Help Apply								

Слика 4.31.1-Joint Actuator1 блок - параметри

Зглоб између два тела представља релативни степен слободе између тих тела. (Joint Actuator) блок побуђује кретање (Joint) блока тј. зглоба између тих тела када се на њега доведу неки од ових сигнала:

- Генералисана сила:
 - Сила за транслаторно кретање дуж призматичног зглоба
 - Обртни момент за обртно кретање цилиндричног зглоба
- Кретање
 - Транслаторно кретање за призматични зглоб у смислу положаја, брзине и убрзања.
 - Обртно кретање цилиндрични зглоб у смислу брзине и убрзања.

Генералисана сила или кретање је функција времена која се добија када се доведе Симулинк сигнал на улаз актуатор блока. Актуатор блок је повезан на Joint блок одакле се затим примењује добијени сигнал дуж или око осе зглоба у референтном координатном систему. При томе координатни системи базе и пратиоца требају бити претходно усаглашени. У овом случају Revolute зглоб 6 има само један степен слободе а то је обртање ротора са ексцентром унутар тела робота. Као што се види на слици 4.35 изабрано је да се улазни симулинк сигнал интерпретира као обртни момент у **[N*m]** јединицама.

4.17 Constant блок



Слика 4.32 – Constant блок припада (Simscape – SimMechanics – Sources библиотеци)

🙀 Sourc	e Block Parameters: Constant2						
Constar	Constant						
Output the constant specified by the 'Constant value' parameter. If 'Constant value' is a vector and 'Interpret vector parameters as 1-D' is on, treat the constant value as a 1-D array. Otherwise, output a matrix with the same dimensions as the constant value.							
Main	Signal Attributes						
Constan	t value:						
0.00000	03						
🔽 Inter	rpret vector parameters as 1-D						
Sampling	mode: Sample based 👻						
Sample t	ime:						
10	10						
0	OK Cancel Help						

Слика 4.32.1 – Constant2 блок - параметри

Блок Constant на излазу даје неку константну вредност која може бити матрица произвољних димензија. У овом случају изабрано је да буде 1-D матрица.

Након што су сва тела и све везе између тела подешене и када се у механизме поставе одговарајући актуатори са жељеном побудом притисне се дугме (Start simulation) у главном прозору блок дијаграма.



Слика 4.33– SimMechanic – Simulink Start simulation дугме на прозору са блок дијаграмом математичког модела робота

Уколико је све урађено како треба појавиће се прозор са визуелним приказом математичког модела робота у радном режиму. Дакле моћи ће да се види померање сваког дела механизма онако како смо га пројектовали у SolidWorks програму.



Слика **4.34**– SimMechanic – Simulink прозор са визуелним приказом математичког модела робота

Математички модел робота је овим завршен. Следећи корак његова анализа. Испитивање се врши тако што се на погонску осовину механизма доведе обртни момент жељене вредности а на одређена места која нас занимају поставе сензори. Имамо могућност избора између сензора који се постављају на зглобне везе између тела за мерење реакција у ослонцима и на оне који се постављају на сама тела.

4.18 Joint Sensor блок



Слика 4.35–Joint Sensor блок припада (Simscape – SimMechanics – Sensors & Actuators библиотеци)

Block Parameters: Joint S	ensor2		x			
Measures linear/angular position, velocity, acceleration, computed force/torque and/or reaction force/torque of a Joint primitive. Spherical measured by quaternion. Base-follower sequence and joint axis determine sign of forward motion. Outputs are Simulink signals. Multiple output signals can be bundled into one signal. Connect to Joint block to see Connected to primitive list.						
Measurements						
Primitive Outputs			-			
Connected to primitive:	R1	•				
🔽 Angle	Units:	[rad 🔻				
Angular velocity	Units:	rad/s 👻				
Angular acceleration	Units:	rad/s^2 ▼				
Computed torque	Units:	N*m 💌				
Joint Reactions						
Reaction torque	Units:	[bf*ft 💌				
Reaction force	Units:	N -				
Reaction measured on:	Base	•				
With respect to CS:	Local (Body CS)	•				
Output selected param	eters as one signal.		_			
ОК	Cancel	Help Apply				

Слика 4.35.1–Joint Sensor2 блок - параметри

Као што се на слици 4.35.1 види додавањем (Joint) сензора на блок дијаграм модела робота добијамо могућност да у реалном времену меримо вредности као што су:

- Транслаторна кретања призматичних веза у смислу њиховог положаја, брзине, и убрзања.
- Обртна кретања у зглобовима који то омогућавају у смислу њиховог угаоног положаја, угаоне брзине и убрзања.

Као и мерење реакција у ослонцима. Након што се изаберу величине које желимо да посматрамо следи избор јединица у којима ће се оне изражавати и даље прослеђивати. Подаци су сада ту али их још увек не можемо видети. Да би подаци постали видљиви користи се Scope блок.

4.19 Ѕсоре блок



Слика **4.36**–**Scope** блок припада (Simulink – Sinks – Scope библиотеци)

🛃 'Levi rotor - Eccentric shaft-2 💶 💷 💌
General Data History Tip: try right clicking on axes
Axes
Number of axes: 4 📃 floating scope
Time range: 0.4
Tick labels: all 💌
Sampling
Sample time 🗸 0
OK Cancel Help Apply

Слика 4.36.1-Scope блок – параметри

На слици 4.36.1 се виде изабрани параметри за (Levi rotor са ексцентром - Eccentric shaft-2) scope блок. Изабрано је да приказује четири осе односно да има четири улаза због тога што је претходно на слици 4.35.1 параметрима Joint Sensor2 блока изабрано да нам сензор на свом излазу даје четири различите излазне величине.

4.20 Scope блок у блок дијаграму - пример



Слика **4.36.2**– SimMechanic – Simulink Scope блок у блок дијаграму из прилога 1 математичког модела робота са размештеним компонентама због лакше прегледности

На слици 4.36.2 се види начин повезивања Joint Sensor и Revolute блокова. Пример за (JointSensor2 и Revolute6) блокове. На Revolute6 блоку је пре повезивања неопходно додати још један порт односно улаз/излаз.

Дизајнирани робот се састоји од два одвојена механизма са по три ноге на левој и по три ноге на десној страни тела. За њихово покретање су нам потребна два одвојена актуатора – мотора. Као и сваки реални механизам и овде постоје губици услед трења које погонски мотор мора да савлада. За овај механизам је по принципу пробе и грешке у оквиру математичког модела дошло до минималне потребне вредности момента силе на ротору са ексцентром. То је минимална потребна вредност да би се механизам празном ходу покренуо. Због приказа ефекта који има појачавање интензитета обртног момента на погонским моторима изабрано је да на леви ротор буде доведена та минимална потребна вредност за покретање. Како су и леви и десни механизми робота потпуно исти могуће је у реалном времену довођењем неке друге вредности обртног момента на други тј. десни ротор поредити утицаје различитих обртних момената на све компоненте механизма.



4.21 Повезивање сензора са ослонцима осовина са ексцентром

Слика 4.37– SimMechanic – Simulink – повезивање сензора са ослонцима осовина са ексцентром

На слици 4.37 се види део блок дијаграма математичког модела робота са маркираним везама са ослонцима погонских осовина са ексцентром. Вредност од 0,000003 [N*m] је минимална вредност која је неопходно довести на ротор са ексцентром да би се механизам покренуо. На слици 4.37 је она обележена плавом елипсом. Ефекат који се тиме добија у лежишту тог ротора се може видети на слици 4.37.1. У исто време је на десни ротор доведен константни обртни момент од 0,000005 [N*m] обележен жутом елипсом на слици 4.37 а резултати које он изазива на механизам се могу видети на слици 4.37.2.

4.22 Приказивање очитаних вредности са сензора на улежиштењу





Слика **4.37.1**– Приказивање очитаних вредности са сензора на улежиштењу левог ротора са ексцентром при константном обртном моменту од 0,000003 [N*m] и дефиниција боја



Слика **4.37.2**– Приказивање очитаних вредности са сензора на улежиштењу десног ротора са ексцентром при константном обртном моменту од 0,000005 [N*m]

Из слика 4.37.1 и 4.37.2 се јасно може уочити да разлика примењених обртних момената на погонским роторима има утицаја на оптерећења у местима на којима смо поставили сензоре. У ствари они имају утицаја на брзину достизања тих оптерећења. Оно што треба напоменути је да је за експеримент изабрано да обртни момент буде константан за сво време испитивања за разлику од рецимо електромотора једносмерне струје који имају другачију карактеристику која се мења у зависности од оптерећења и постигнутог броја обртаја у секунди. Код једносмерних мотора је почетку обртни момент велики када је брзина мала а касније како се брзина обртања повећава обртни момент иде ка нижим вредностима.

На основу дијаграма са слика 4.37.1 и 4.37.2 се може проценити какве силе можемо да очекујемо за одређену вредност постигнуте угаоне брзине као и фреквентну карактеристику тих сила по осама. Одакле може да се уради анализа замора материјала, одреди карактеристика лежајева у улежиштењу итд.

4.23 Body Sensor блок



Слика 4.38–Body Sensor блок припада (Simscape – SimMechanics – Sensors & Actuators библиотеци)

Block Parameters: Body Sensor3							
Body Sensor							
Measures the motion of the Body coordinate system to which the Sensor is connected. Sensor measures any combination of translational position, velocity, and acceleration; and rotational orientation, angular velocity, and angular acceleration. Choosing the coordinate system determines the axes in which the motion components are represented. Output is a Simulink signal. Multiple output signals can be bundled into one signal.							
Measurements							
With respect to CS:	Absolu	te (World) 🔹					
Position [x;y;z]	Units:	m					
Velocity [x';y';z']	Units:	m/s 🔹					
Angular velocity [Rx';Ry';Rz']	Units:	[rad/s ▼]					
Rotation matrix [3 x 3]:							
Acceleration [x";y";z"]	Units:	[m/s^2 ▼					
Angular acceleration [Rx";Ry";Rz"]	Units:	[rad/s^2 ▼					
Output selected parameters as one	Output selected parameters as one signal.						
		OK Cancel Help Apply					

Слика 4.38.1– Body Sensor3 блок – параметри

Увођењем сензора који се постављају у координатни систем тела чије кретање желимо да посматрамо добијамо могућност мерења његовог кретања и то :

- Било коју комбинацију положаја при транслацији и брзине и убрзања
- Као и положаје при обртним кретањима, угаоне брзине и угаона убрзања.


Слика 4.38.2– SimMechanic – Simulink – начин повезивања сензора тела са Leg_2_2 и одговарајућим Scope блоком

당 Block I	Block Parameters: Leg_22							
Body Represe	Body Represents a user-defined rigid body. Body defined by mass m. inertia tensor I. and coordinate origins and axes for center of gravity (CG)							
and othe are actu	er user-spe ated sepa	cified Bod rately. Thi	ly coordinate systems. This dialog sets Boo s dialog also provides optional settings for	dy initial po customize	sition and orientation, ur d body geometry and col	nless Body and/or cor or.	nnected Joints	
-Mass pro	operties							
Mass:	0.00017	0479				k	g 🔻	
Inertia:)09,-1.3	1189e-013	3;4.69223e-009,2.66089e-009,5.16077e-	013;-1.31	189e-013,5.16077e-013,	1.36285e-008] k	g*m^2 →	
Position	Orien	tation	Visualization					
Show Port	Port Side	Name	Origin Position Vector [x y z]	Units	Translated from Origin of	Components in Axes of		
	Right ,	CG	[-0.0229789 -0.00480002 0.00204358]	m 👻	World 👻	World		
	Right 🚽	CS1	[-0.0201351 0.00361934 0.00300559]	m 👻	World 🗸	World	-	
	Left ,	CS2	[-0.0226351 -0.00159025 0.00164169]	m 👻	World 🗸	World		
	Left ,	CS3	[-0.00813511 -0.00159025 0.00164169]	m 👻	World 🗸	World		
	Left ,	CS4	[-0.0201351 0.00729568 0.0127178]	m 👻	World 🗸	World		
	Left ,	CS5	[-0.0185351 0.00634788 0.000648678]	m 👻	World 🗸	World		
	OK Cancel Help Apply							

Слика 4.38.3- Тело Leg_2_2 - параметри



4.24 Приказивање очитаних вредности са сензора на телу

Слика **4.38.4**– Приказивање очитаних вредности са сензора на телу Leg_2_2 (Noga 2_-2 na levom rotoru)



Слика 4.38.4– SimMechanic – Simulink – начин повезивања сензора тела са Rod_1-3 sa одговарајућим Scope блоком

당 Block	Block Parameters: Rod_1-3						
Body	Body						
Represe and oth Joints a	Represents a user-defined rigid body. Body defined by mass m, inertia tensor I, and coordinate origins and axes for center of gravity (CG) and other user-specified Body coordinate systems. This dialog sets Body initial position and orientation, unless Body and/or connected Joints are actuated separately. This dialog also provides optional settings for customized body geometry and color.						
-Mass pr	operties						
Mass:	9.11134	e-005				kg	-
Inertia:	[1.0846	5e-010,0,	0;0,2.41634e-009,0;0,0,2.46407e-009]			(kg*n	n^2 →
Position	Orien	tation	Visualization				
Show Port	Port Side	Name	Origin Position Vector [x y z]	Units	Translated from Origin of	Components in Axes of	<u>I</u>
	Right -	CG	[-0.0191351 0.00285271 0.00717975]	m 👻	World 👻	World 👻	
	Right ,	CS1	[-0.0201351 0.00285271 0.00717975]	m 👻	World 👻	World 🗸	
	Left ,	CS2	[-0.00813511 -0.00159025 0.00164169]	m 👻	World 👻	World 🗸	
	Left 🗖	CS3	[-0.0181351 0.00740041 -0.00934958]	m 👻	World 👻	World 🗸	
	Right 🖣	CS4	[-0.0201351 0.00729568 0.0127178]	m 👻	World 👻	World 🗸	
V	Right -	CS5	[-0.0181351 0.00729568 0.0127178]	m 👻	World 👻	World 🗸	
	OK Cancel Help Apply						

Слика 4.38.3- Тело Rod_1-3 (Poluga 1-3 na levom rotoru) - параметри



Слика **4.38.4**– Приказивање очитаних вредности са сензора на телу Rod_1-3 (Poluga 1-3)

Све информације које су ми биле неопходне за рад у Матлаб програму сам пронашао на Матлабовом сајту [4].

5. 3DS Max



Слика 5.1 – Autodesk 3ds Max 2010 - интро

У циљу боље презентације кретања робота у виртуелном окружењу коришћен је програм 3DS Max. Овај програм има велике могућности по питању анимације и дизајнирања виртуелних простора. Такође поседује и алат (Reactor) за симулирање и презентовање деловања гравитације и реакција различитих објеката на контактним површинама. Тај алат је веома захтеван по питању хардвера тако да овом приликом није коришћен.

Урађена је анимација истовременог кретања више робота у окружењу виртуелног простора са освртом на естетику и јасније представљање начина кретања. Оно што овај програм омогућава је стварање различитих перспектива неког простора. То касније може имати примену и креирању софтвера за његово управљање. Видео који се направи из перспективе робота може бити искоришћен за проверу алгоритама препознавања препрека и њиховог избегавања при кретању, чак пре него што буде реализован физички модел робота и пре него што буде стављен у неко реално окружење за које је намењен. Овим се постиже боље сагледавање захтева који се пред дизајнирану конструкцију робота постављају као и провера квалитета одговора дизајнера конструктора на те захтеве. Тиме се скраћује време потребно развој готовог производа и смањују трошкови за стварање прототипа.

3DS Max је више дизајнерски а мање инжењерски програм тако да није баш погодан за креирање прецизних и компликованих конструкција. Због тога је искоришћен постојећи модел механизма робота направљен у SolidWorks програму који је сачуван у компатибилним већ помињаним STL фајловима. То је учињено за сваку појединачну компоненту механизма. Приликом овог пребацивања се губе релативни односи делова механизама тако да се морају поново дефинисати како би довођењем кретања на роторе са ексцентром добила жељена померања осталих компоненти механизма. Због специфичног начина повезивања компоненти морало се урадити модификовање постојећег 3D модела креирањем додатних отвора при врховима ногу и додавањем осовиница који ће се у те отвора постављати. Овај корак је неопходан због лакшег дефинисања обртних оса у механизму.



5.1 Радне површине и командни интерфејс

Слика 5.2 – 3ds Max (радне површине и командни интерфејс)



Слика 5.3 – Модел робота са додатним осовиницама и додатим отворима у компонентама механизма

Након што се компоненте позиционирају потребно је дефинисати њихово кретање а то се ради на другачији начин него што је to случај у SolidWorks-u.

Неопходно је направити инверзне кинематичке ланце односно повезати све компоненте механизма у њих на одговарајући начин.

🜀 Grid and Snap Settings 📃 🗖 🗙						
Snaps	Options H	Home Grid	User G	rids		
Stand	lard	- Ove	rride OFF			
	Grid Points Pivot Perpendicular Vertex Edge/Segment Face		rid Lines ounding Bo angent ndpoint idpoint enter Face	ox e		
	Clea	ar All				

Слика 5.4 – Прозор са подешавањем за избор кључних тачака у ланцу

* 🛛 🗛 🎯 🖵 🥕				
◯଼ ପି ଣ 🛱 🖻 🗮 🏄				
Standard 🔻				
- Object Type AutoGrid Bones Ring Array Sunlight Daylight Biped				
- Name and Color				
 IK Chain Assignment IK Solver: SplineIKSolver Assign To Children Assign To Root 				

Слика 5.5 – Прозор са параметрима типа објеката и начина њихове интерпретације у ланцу

Schematic View 1					
Edit Select List Views Layo	ut Options Display View 厵 툴 몸로슬솜 뭑 툭	P 🚖 🗹 Schematic View 1			
-fin Assem1 - Pin_for	3	Assem1 - Eccentric			
		Assem1 - Pin-4			
Display 💌 Relationships Constraints Controllers	Assem1 - Rod_1-3	Point03	Point04		
Param Wires Light Indusion Modifiers	Assem1 - Pin_for3 Assem1 - Leg_3-1	Assem1 - Leg_22 Assem1 - Pin_for3	Assem1 - Rod_1-2		
Base Objects Modifier Stack Materials Controllers	Assem1 - Pin-5	Assem1 - Rod_1-1	Assem1 - Leg_21		
P R S Expand Focus		Point01	Assem1 - Pin-3		
<mark>،</mark> قر	Click or click-and-drag to select objects		·····································		

Слика 5.6 – Шематски приказ повезаних компоненти механизма леве стране робота

Schematic View 1				
Edit Select List Views Layo	out Options Display View			
	: 짽 로 모모립 급	🗄 🤝 🖨 🗹 Schematic	:View 1	- ⊕ ₩
		Assert Dis fact		
IK Chainus		Assemi - Pin_iora		IK Chambs
		Accord Facartia		
		Assemi - Eccentric		
Display		Access Dia 7		
- Relationships		Assem1 - Pin-7		
Constraints				
Controllers	Assem1 - Rod_1-4	Point06	Point05	
Light Inclusion				
Modifiers	Assem1 - Pin_for3	Assem1 - Rod_1-6	Assem1 - Leg_23	
Entities				
 Base Objects Modifier Stack 	Assem1 - Leg_3-2	Assem1 - Pin_for3	Assem1 - Pin_for3	
Materials				
Controllers	Assem1 - Pin-6	Assem1 - Leg_24	Assem1 - Rod_1-5	
Expand Focus		Assem1 - Pin-8	Point07	
				*
•				4
Eq. 1	Click or click-and-drag to select o	bjects		4) Q ⁺ C, [I] [I] (Y)

Слика 5.7 – Шематски приказ повезаних компоненти механизма десне стране робота

Schematic View 1	the state of the s	
Edit Select List Views Layout Options Display View		
□ 🕟 🗞 🗶 밑묘 🖻 몽코클램 뭑	😴 🚖 📝 Schematic View 1 🔽 🔍 🕲	
		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	Assent	
Assent-	IKCRETOSI IKCRETOSI IKCRETOSI Assemit-A Assemit-A Assemit-A Assemit-A Assemit-A Assemit-A	Assem1
Assem1-		Assem1
Assemi -		Assem1- Exists Exists
Assem1 Point26		Assemt- Assemt Assemt
Assem1-		Assemt
Assem1-		Assemt
Assent-		RECTOR RECTOR
		-
<	III.	4
Click or click-and-drag to select object	S	4) 4 [#] [1] [1] [2]

Слика 5.8 – Шематски приказ повезаних компоненти механизма читавог робота

5.2 Дефинисање кретања по осама у току времена

Након завршеног робота дефинише се кретање по осама у току времена и то прво окретање левог и десног погонског ротора. А затим и њихање читавог робота по осама тако да се у сваком тренутку симулира додир ногу са подлогом.



Слика 5.9 – Модел робота са подешавањем ротације левог ротора у интервалу од 20 секунди



Слика 5.10 – Модел робота са подешавањем ротације тела у интервалу од 20 секунди



Слика 5.11 – Модел робота са исправно позиционираним и дефинисаним компонентама механизма

Изабран је временски интервал од 20 секунди буде време за које се начини један пун циклус осцилација у кретању робота. Касније се када се зада кретање у простору само дефинише број пуних циклуса односно укупно време трајања кретања и почетни и крајњи положај.

5.3 Креирање 3D окружења

За следећи корак је потребно направити окружење у којем ће се робот кретати. Зидове, под и плафон виртуелне просторије, осветљење, и објекте унутар тог простора. Дефинисати материјале од којих су они сачињени као и погледе из којих ћемо простор посматрати.

Након тога се у 3D окружење уноси завршен модел робота се слике 5.11 онолико пута колико је потребно. Унето је пет робота и дефинисане су њихове путање. Следећи корак је дефинисање камера односно погледа. На камерама се може подешавати све као и на реалној камери. Камера се може поставити да буде фиксна као што је то случај са камером 1 на сликама 5.17 и 5.18 и камером 4 на сликама 5.24 и 5.25. Видео снимци онога што камере виде у временском интервалу од 200 фрејмова ће бити приказани на презентацији. Камера 2 на сликама 5.20 и 5.21 има фиксну тачку у простору али може да прати кретање задатог објекта где год да се он креће. На сликама 5.22 и 5.23 је приказано оно што види мобилна камера закачена за предњи део робота. Та камера се креће заједно са роботом и омогућава нам да свет видимо из његове перспективе.



Слика 5.12 – Неки од параметара које је потребно подесити пре почетка креирања 3D окружења

* 🛛 🗛 🎯 🖵 🥕				
@ @ @ @ @ #	- Parameters			
AEC Extended 🔹	Width: 0,127m ‡ Height: 2,438m ‡			
- Object Type AutoGrid	Justification	* 2		
Foliage Railing Wall	LeftCenter			
- Name and Color	Right	Windows 👻		
- Keyboard Entry	✓ Generate Mapping Coords.	- Object Type		
x: 0,0m 🗘	Real-World Map Size	Awning Casement		
Y: 0,0m 🗘		Fixed Pivoted		
Z: 0,0m		Projected Sliding		
Add Point		- Name and Color		
Close Finish Pick Spline		FixedWindow01		

Слика 5.13 – Нека подешавања која су потребна за дефинисање простора - зидови и прозори

5.4 3D окружење са унетим моделима робота



Слика 5.14 – Изглед простора са позицијама камера робота и осветљења



Слика 5.15 – Изглед простора из различитих равни посматрања



Слика 5.16 – 3D окружење из птичије перспективе без плафона

5.5 3D окружење - камера 1



Слика 5.17 – 3D окружење - камера 1 (wireframe)



Слика 5.18 – 3D окружење - камера 1

5.6 3D окружење - камера 2



Слика 5.19 – 3D окружење - камера 2 (почетни положај) Т = 0/200



Слика 5.20 – 3D окружење - камера 2 (wireframe) T = 164/200



Слика 5.21 – 3D окружење - камера 2 Т = 164/200

5.7 3D окружење - камера 3



Слика 5.22 – 3D окружење - камера 3 (wireframe)



Слика 5.23 – 3D окружење - камера 3

5.8 3D окружење - камера 4



Слика 5.24 – 3D окружење - камера 4 (wireframe)



Слика 5.25 – 3D окружење - камера 4

6. Закључак

Ако се пажљивије погледа и пусти у погон HexBug – Alpha микро робот са слике 1.1 може се приметити да конструкција његовог механизма омогућава кретање само по равним подлогама. Заобилажење препрека је могуће по шеми са слике 6.1. Једини сензори на овом роботу су тактилне антене.



Слика 6.1 – HexBug – Alpha заобилажење препрека

На основу истраживања које је извршено и објашњено у другом поглављу код овог робота се може уочити да су испуњена прва два услова 2.2.1 и 2.2.2 са страна 10 и 11 која су потребна за кретање. А то су: први да је због једноставности управљања роботом у механизам уграђена контрола покрета ногу.

И други који је неопходан за кретање и којим се формира неопходан редослед померања ногу приказан на слици 2.6 за инсекта са шест ногу.

Као што је већ речено овај робот може да се креће али није у стању да савлада било какав нераван терен као ни мекше подлоге.

Недостаје му и трећи и четврти услов а то је могућност да се прилагођава подлози уз помоћ еластичних ногу у вертикалној и хоризонталној равни.

Посматрањем и проучавањем природе се може много научити. У овом примеру је приказано да непотпуна примена бионичких принципа као решење за задати дизајнерски проблем доводе до непотпуних односно резултата који не испуњавају наша очекивања. А очекивања су да робот може да се креће по неравним подлогама.

Да би робот могао лако да се креће неопходно му је обезбедити и еластична померања у вертикалној и хоризонталној равни кретања.

Софтверски алати који су коришћени у овом раду су веома корисни у процесу дизајнирања машина за које имамо природу као инспирацију.

Природу треба посматрати као велику библиотеку у коју се милионима година таложило знање. Треба је чувати јер са сваком несталом врстом оно одлази у неповрат.

7. Литература

[1] Рашуо, Б., Предавања Бионика у Дизајну_2010 Проф. Бошко Рашуо.pdf - Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд 2010

- [2] http://www.hexbug.com/original/original-hexbug-alpha.html HEXBUG Micro Robotic Creatures
- [3] <u>http://polypedal.berkeley.edu/cgi-bin/twiki/view/PolyPEDAL/WebHome</u> PolyPEDAL Lab University of California, Berkeley
- [4] <u>http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/mech/</u> MATLAB R2011 Documentation -> SimMechanics

8. Прилог

Прилог 1 SimMechanic – Simulink блок дијаграм математичког модела робота