

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

Катедра за сигнале и системе



ДИПЛОМСКИ РАД

**Управљање роботском руком са два степена
слободе на основу електромиографских и
кинематских сигнала**

Кандидат

Далибор Вељковић, 2013/0028

Ментор

Др Милица Јанковић, доцент

Београд, септембар 2017. године

Захвалница

Желим да се захвалим свом ментору, доц. др Милицы Јанковић, на корисним саветима и сугестијама које ми је пружила током израде овог рада у Лабораторији за биомедицинско инжењерство Електротехничког факултета у Београду.

Хвала доц. др Кости Јовановићу на указаној помоћи при изради овог рада и корисним саветима.

Хвала Татјани Вучковић на бескрајном стрпљењу и пруженој подршци.

Хвала свим колегама и колегиницама са Одсека за сигнале и системе на квалитетним саветима и лепом дружењу током претходних година.

Хвала породици и пријатељима на подршци.

Далибор Вељковић,

У Београду, септембар 2017.

Садржај:

1. Увод	5
1.1 Имитирање покрета	5
1.2 Принцип рада система заснованих на имитирању покрета.....	7
1.3 Циљ рада	9
2. Опис система	9
3. Опис хардвера	12
3.1 Роботска рука.....	12
3.2 Систем за аквизицију сигнала	13
3.3 Сензори.....	14
3.3.1 Акцелерометар	15
3.3.2 Опрема за мерење ЕМГ сигнала	16
4. Опис софтвера	17
4.1 Lab View	17
4.2 Функцијске глобалне варијабле.....	18
4.3 NI-DAQ mx.....	20
4.4 Lego NXT.....	22
4.5 Notifier механизам.....	23
4.6 Lab View пројекат.....	26
4.7 Главни програм за контролу роботске руке	26
4.7.1 Архитектура програма	26
4.7.2 Интерфејс програма	29
5. Аквизиција и обрада сигнала	30
5.1 Обрада података са акцелерометра.....	30
5.2 Калманов филтар.....	31
5.2.1 Рекурзивни алгоритам за естимацију методом најмањих квадрата	31
5.2.2 Пропагирање стања и варијанси	32
5.2.3 Једначине Калмановог филтра и принцип рада	33

5.2.4 Особине Калмановог филтра	34
5.3 Филтрирање сигнала са акцелерометра	35
5.3.1 Начин обраде и моделирање акцелерометра.....	35
5.3.2 Резултати филтрације	36
5.4 Обрада ЕМГ сигнала	38
5.4.1 Особине ЕМГ сигнала	38
5.4.2 Аквизиција ЕМГ сигнала.....	39
5.4.3 Обрада ЕМГ сигнала	40
5.4.4 Резултати	41
6. Управљање роботском руком.....	41
6.1 PID регулација	42
6.2 Подешавање параметара PID регулатора.....	43
6.3 Задавање референце моторима	43
7. Дискусија и закључак.....	44
Литература	45
Списак слика	46
Списак табела	47

1. Увод

1.1 Имитирање покрета

Имитирање покрета (енг. *movement mimicking*) представља управљање, најчешће роботским манипулаторима, на основу људског покрета који се, зависно од врсте покрета и намене самог система, детектује одговарајућим сензорима.

Системи засновани на имитирању покрета проналазе примену у областима хирургије, рехабилитације, разним пољима роботике као што су индустријска и хуманоидна роботика, као и у многим другим пољима.

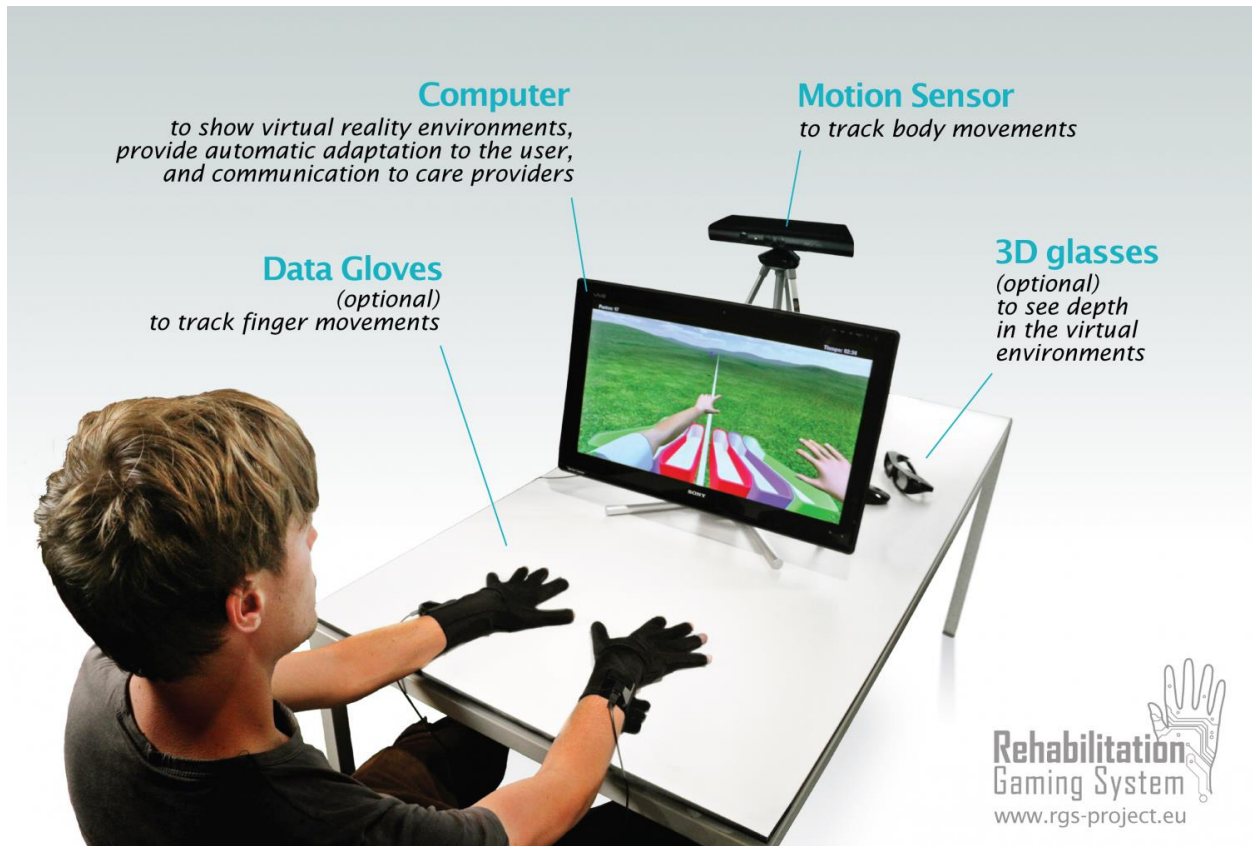
Најпознатији представник ових система јесте Да Винчи асистент хирушким захватима (енг. *Da Vinci Surgical System*), који се састоји од четири роботске руке које се могу опремити разним хирушким инструментима, а којима управља хирург помоћу конзоле.



Слика 1 - Да Винчи асистент хирушким захватима (1)

Поред хирушких система, чести су системи за рехабилитацију, који у реалном времену бележе покрете пацијената, а на основу база података истоветних покрета, снимљених на здравим испитаницима, упоређују покрет пацијента са покретима из база

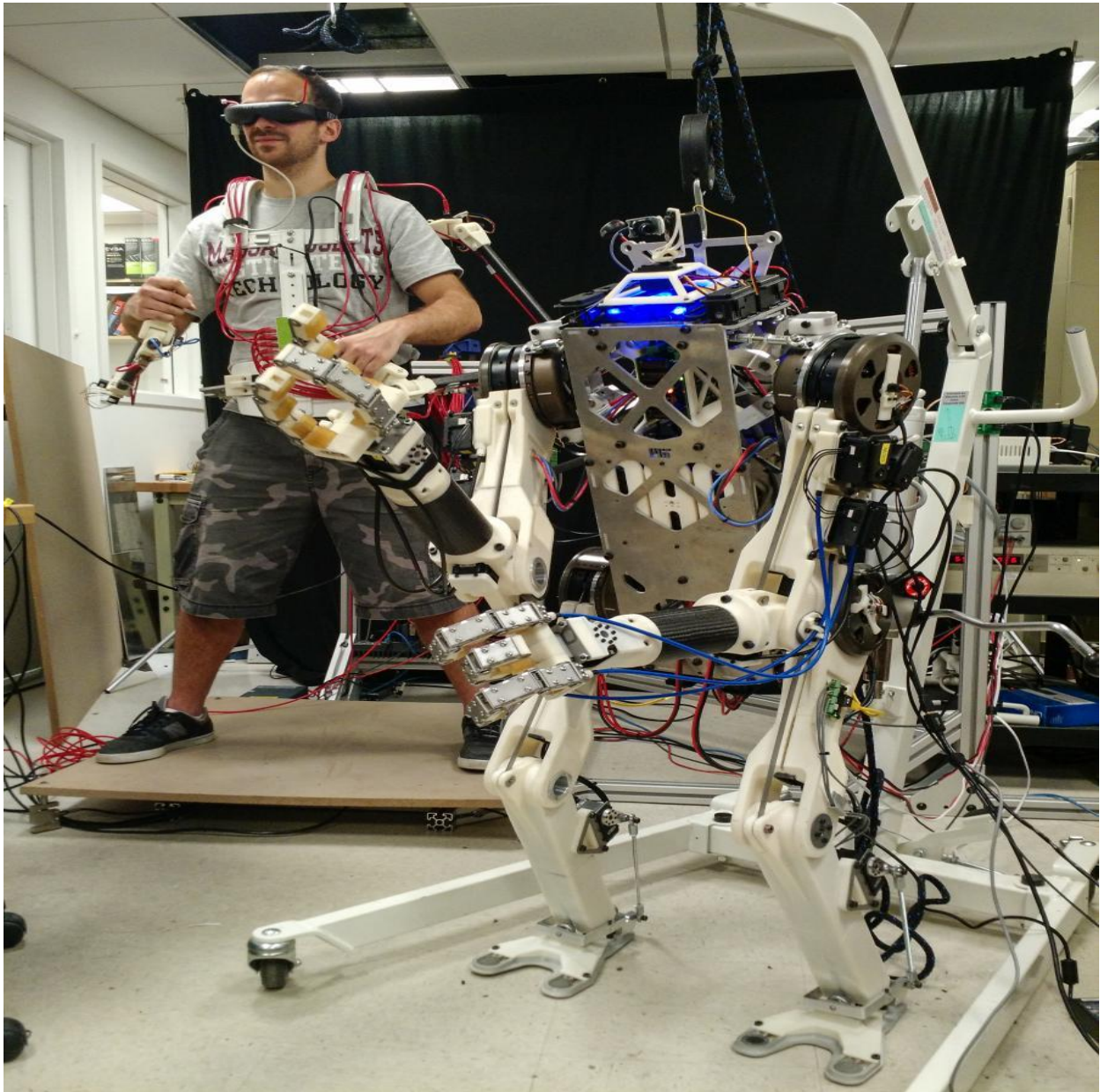
података. Потом се кроз човек-машина интерфејс (енг. *Human-machine Interface*) пацијенту пружа повратна информација о квалитету изведеног покрета, најчешће кроз неку интерактивну апликацију или игрицу која пацијенту помаже у увежбавању покрета и рехабилитацији.



Слика 2 - Пример система за рехабилитацију (2)

Постоје још и разноразни системи чија је намена управљање роботских манипулатора помоћу људског покрета како би се извршио одређен задатак који је исувише опасан за човека али сложеност задатка захтева људског оператера. Пример оваквог система је МИТ Хермес робот (3) који је приказан на Слици 3.

Даље, овакви системи проналазе своју примену у индустрији видео игара где се сензорима детектују људски покрети који даље служе за контролу неког аспекта видео игре.



Слика 3 - МИТ Хермес робот (4)

1.2 Принцип рада система заснованих на имитирању покрета

Пре свега, важно је нагласити да се овакви системи увек имплементирају на некој врсти дигиталног рачунара (микроконтролерски системи, програмабилни логички контролери (PLC), класични рачунари и слично).

Системи засновани на имитирању покрета имају три кључне компоненте: омогућавају аквизицију сигнала, имају имплементирану обраду сигнала и генеришу управљачке сигнале који покрећу одговарајуће актуаторе за имитацију покрета.

Аквизиција сигнала

Како бисмо могли да помоћу дигиталног рачунара људски покрет искористимо за контролу неког система, логичан први корак јесте „мерење“ тј. детекција људског покрета од стране рачунара.

Овај први корак, назива се аквизицијом, тј. мерењем сигнала. Зависно од врсте сигнала, аквизиција се врши помоћу специфичних сензора, тј. уређаја који претварају мерне сигнале у електричне, који се даље прослеђују дигиталном рачунару.

На пример, уколико се врши детекција покрета могу се користити разни инерцијални сензори, енкодери, камере. За мерење електрофизиолошких сигнала користе се разне врсте електрода итд.

На данашњем тржишту је доступан велики број сензора различите намене, цена и квалитета.

Обрада сигнала

У већини случајева, сензори које користимо поред жељене величине мере и разне сигнале из мерног окружења. Ови сигнали се називају мерним шумом и нарушавају квалитет мерења. Шум који се јавља при мерењу зависи од врсте мерења, локације, окружења, квалитета опреме и слично.

На пример, честа је појава „шума на 50Hz“, чији је извор електрична индукција у кабловима који спајају сензор са рачунаром, а потиче од електричног поља које се ствара услед присуства наизменичне струје фреквенције 50Hz у електричним инсталацијама објекта у коме се налази мерна опрема.

При мерењу ЕМГ сигнала често се као шум могу јавити ЕКГ, ЕЕГ сигнали и шум који се јавља услед дисања.

Због присуства шума, сигнал који се добија директно са сензора је често неупотребљив јер је интензитет шума често много већи од интензитета корисног сигнала.

За извлачење корисног сигнала из мерења добијених са сензора користе се различите методе обраде сигнала. Уколико је позната природа шума и/или природа процеса који меримо помоћу сензора, корисне инфомрације из мерног сигнала можемо добити разним методама филтрације. Филтрација се може вршити у временском или фреквенцијском домену. Алгоритми филтрације могу се имплементирати на дигиталном рачунару или као хардверски филтри.

Осим филтрације постоје и друге методе обраде сигнала, помоћу којих се долази до жељених информација на основу мерења са сензора, као што су: глађење сигнала (енг. *smoothing*), разни алгоритми вештачке интелигенције, итд.

Генерисање управљачких сигнала

После филтрације, корисна информација са сензора може се користити за даље процесирање и прорачун других корисних информација, које се даље користе у складу са наменом система.

На пример, уколико је извршено мерење мере отворености шаке, помоћу мерења ЕМГ сигнала, после филтрирања, добијени податак се може користити као референца за положај мотора који контролише отварање шаке роботског манипулатора.

Важно је нагласити да системи за имитацију покрета јесу системи у реалном времену (енг. *Real-time Systems*) имплементирани на дигиталном рачунару. То значи да дигитални рачунар периодично добија мерења са једног или више сензора и да на основу тренутних и претходних мерења, као и на основу модела система, дигитални рачунар процењује параметре мерених покрета и добијене информације користи за даље процесирање (управљање роботским манипулатором, итд.)

1.3 Циљ рада

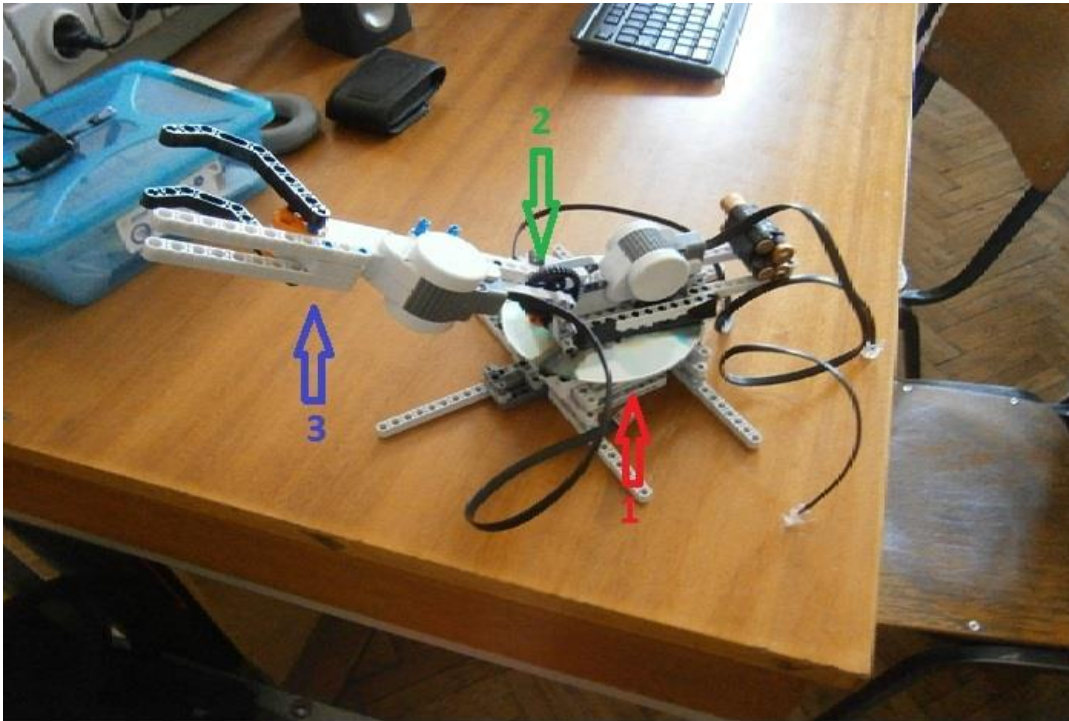
У овом раду описана је комплетна реализација једноставног система за имитацију покрета. Намена система је контролисање кретања роботске руке са два степена слободe и једноставним хватачем, на основу кретања људске руке и отворености шаке људске руке.

Рад садржи следеће целине:

- Опис целокупног реализованог система
- Опис хардвера
- Опис софтвера
- Аквизиција и обрада сигнала
- Управљање моторима
- Дискусија резултата и закључак

2. Опис система

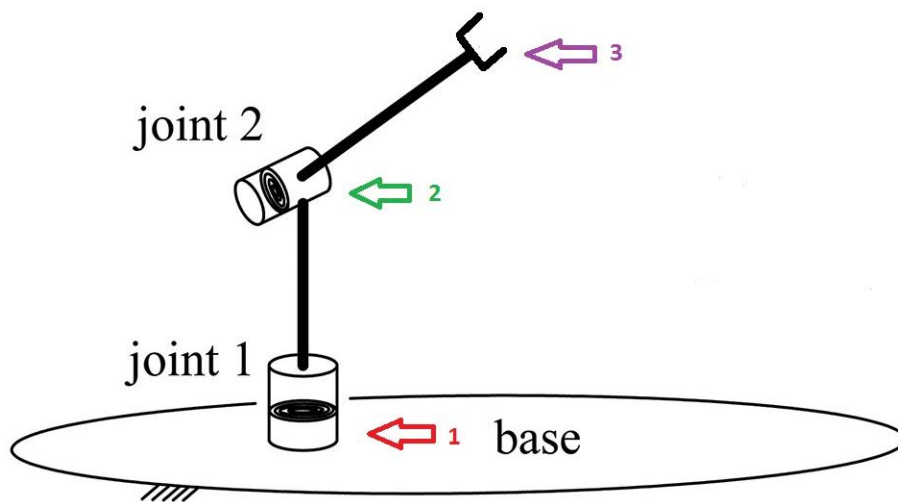
Реализован је систем за управљање роботском руком са два степена слободe и једноставним хватачем на основу покрета људске руке и отворености шаке. Роботска рука је израђена од *Lego Mindstorm (Lego Group, Danska)* делова, и приказана је на Слици 4.



Слика 4 - Роботска рука

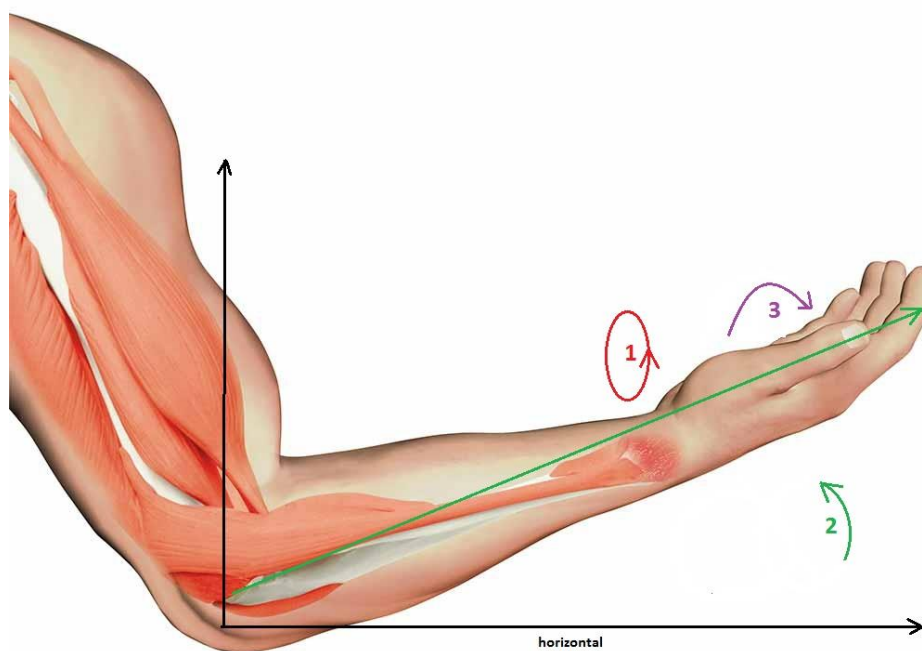
На слици су стрелицама означени покретни зглобови роботске руке. Са 1 је означен зглоб који омогућава да се конструкција руке окреће око вертикалне осе. Са 2 је означен зглоб који служи за подизање/спуштање руке. Са 3 је означен зглоб који служи за отварање/затварање хватача.

На Слици 5 је приказана поједностављена шема руке, са означеним зглобовима.



Слика 5 - Шема роботске руке (5)

На Слици 6 су приказани параметри положаја људске руке који се мере помоћу сензора и на основу којих се формирају референце за управљање моторима роботске руке.



Слика 6 - Покрети људске руке

На слици 6 бројем 1 је означен угао увртања подлактице. Овај угао се одређује помоћу читавања са акцелерометра и представља управљачки сигнал за зглоб 1 роботске руке.

На истој слици, бројем 2 је означен угао који подлактица заклапа са подлогом. Овај угао се такође одређује помоћу читавања са акцелерометра и представља управљачки сигнал за зглоб 2 роботске руке. Померање подлактице нагоре резултује истоветним покретом роботске руке.

Бројем 3 је означена отвореност шаке, она се детектује анализом ЕМГ сигнала са мишића подлактице и представља управљачки сигнал за хватач роботске руке. Отварање шаке резултује отварањем хватача роботске шаке и обрнуто.

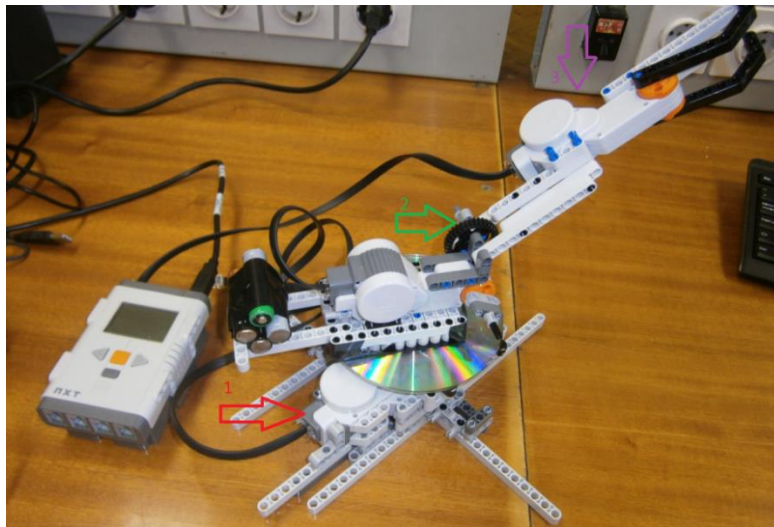
Аквизиција ЕМГ сигнала и сигнала са акцелерометра се врши помоћу NI USB 6009 (National Instruments, Texas) A/D картице.

Софтвер за аквизицију, offline и online обраду сигнала и управљање моторима реализован је у софтверском пакету LabView (National Instruments, Texas). Мањи део offline анализе сигнала реализован је у програмском пакету Matlab.

3. Опис хардвера

3.1 Роботска рука

Роботска рука састављена је од „Lego mindstorm“ делова и управљана је са три „Lego NXT“ мотора. „Lego NXT“ мотори су једносмерни мотори, опремљени инкременталним енкодерима резолуције 1° . По један мотор управља сваким зглобом роботске руке. Роботска рука са означеним зглобовима приказана је на Слици 7.



Слика 7- Роботска рука

Комуникација између рачунара и мотора успостављена је посредством „Lego NXT“ контролера. Контролер је са рачунаром повезан USB везом. Мотори су директно повезани на „Lego NXT“ контролер ETHERNET каблом, преко кога добијају напајање, управљачки сигнал и контролеру шаљу повратну информацију о читавањима са инкременталног енкодера. Све наведене делове производи компанија Lego GROUP, Данска. „Lego NXT“ мотори и контролер приказани су на Слици 8.



Слика 8 - Lego NXT мотори и контролер (6)

3.2 Систем за аквизицију сигнала

Аквизиција сигнала са сензора врши се уз помоћ NI USB 6009 A/D картице која је приказана на Слици 9.



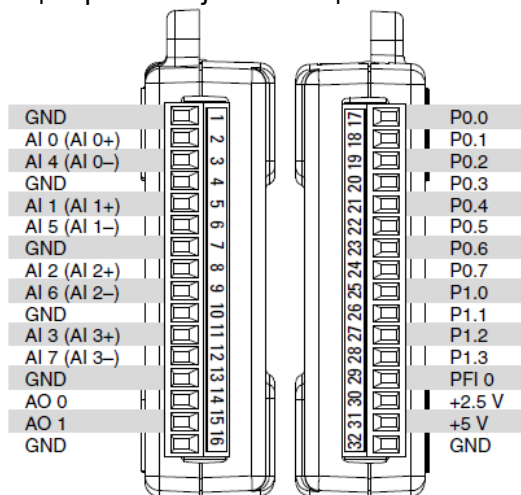
Слика 9 – NI USB 6009 A/D картица (7)

NI USB 6009 A/D картица представља једноставно и јефтино решење за аквизицију сигнала. Картица је намењена за рад са софтверским пакетом LabView који садржи велики број предефинисаних функција за рад са NI USB 6009 картицом, које омогућавају подешавање параметара аквизиције, контролу над током аквизиције, као и приступ подацима који су добијени као резултати аквизиције.

NI USB 6009 A/D картица има следеће карактеристике:

- 8 аналогних улаза (14bit, 48 kS/s)
- 2 аналогна излаза (150 Hz)
- 13 дигиталних улаза/излаза.

Распоред пинова на картици приказан је на Слици 10.

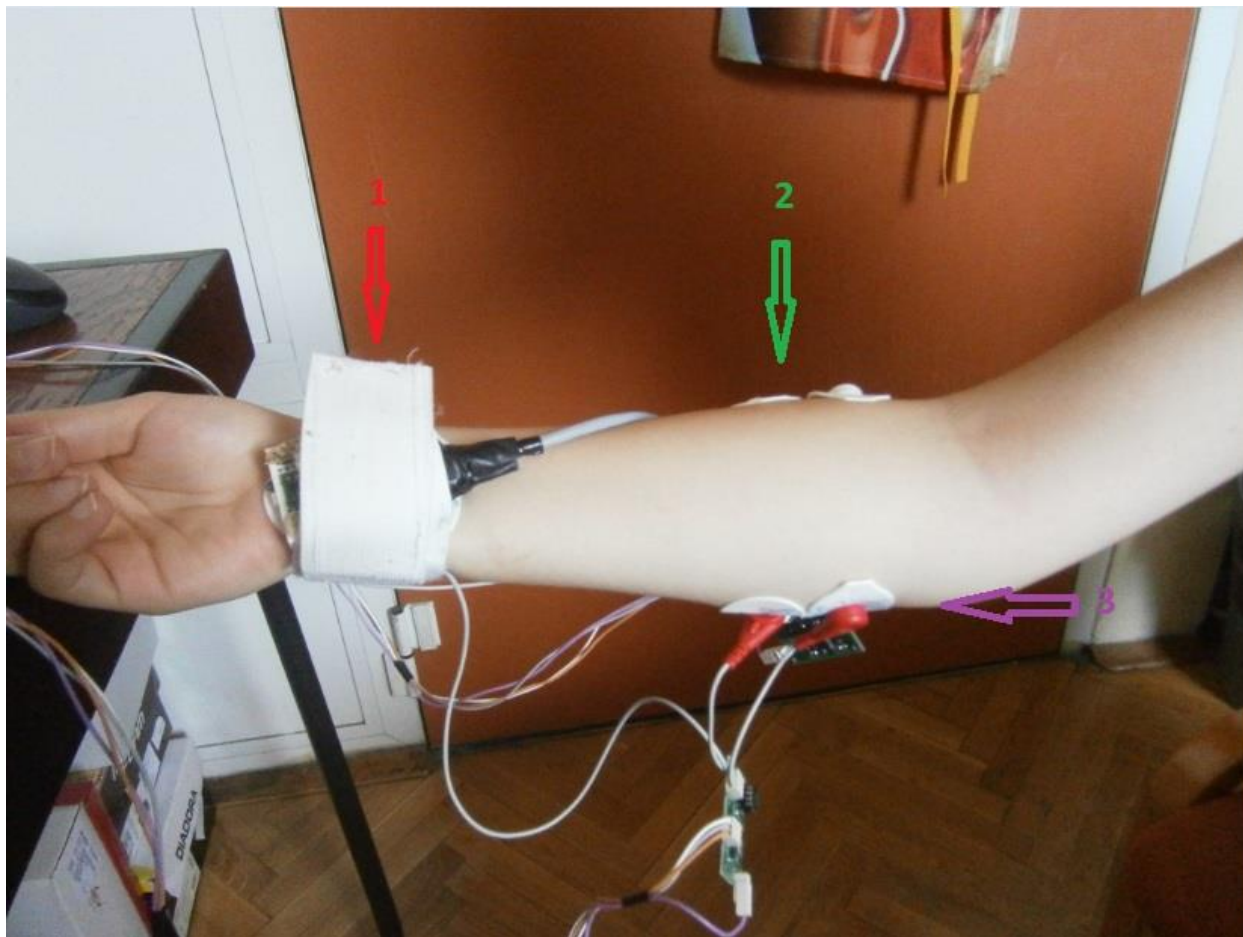


Слика 10 - Распоред пинова (8)

Више информација о овој картици може се наћи у Упутству за употребу на сајту компаније National Instruments.

3.3 Сензори

За потребе овог пројекта коришћен је један акцелерометарски сензор и два пара електрода за мерење ЕМГ сигнала. Поставка сензора приказана је на Слици 11.

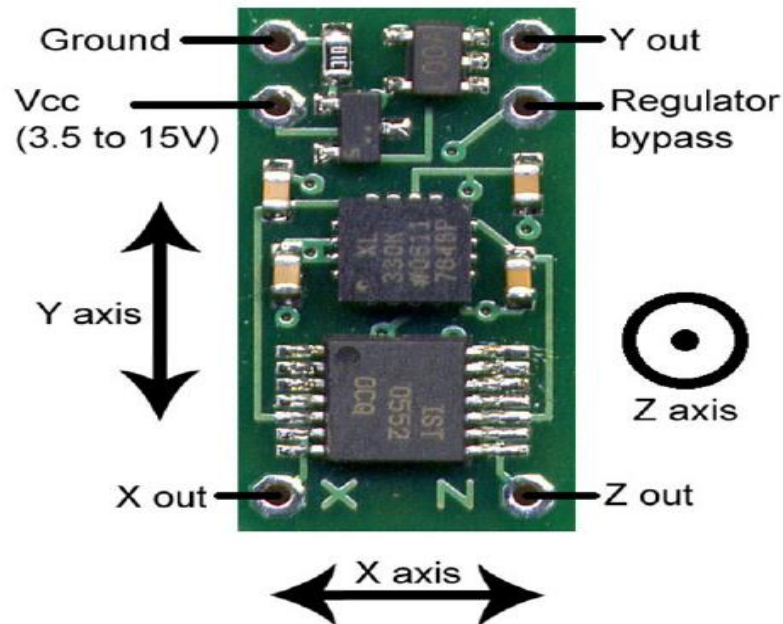


Слика 11 - Поставка акцелерометра и ЕМГ електрода

Бројем 1 на слици 11 означено је место где су акцелерометар и електроде за уземљење фиксиран на руку. Бројем 2 приказане су електроде за мерење ЕМГ сигнала са мишића и *Extensor carpi ulnaris*. Бројем 3 приказане су електроде за мерење ЕМГ сигнала са мишића *Flexor carpi ulnaris*.

3.3.1 Акцелерометар

За одређивање кинематских параметара подлактице коришћен је троосни аналогни акцелерометар DE-ACCM3D (*Dimension Engineering, USA*). Акцелерометар је уређај који врши претварање силе која настаје као последица убрзања (гравитационог или инерцијалног, отуда назив инерцијални елемент) у електрични сигнал помоћу пијезоелемената или на неки други начин. Акцелерометар је приказан на Слици 12.



Слика 12 - DE-ACCM3D акцелерометар

Помоћу datasheet-а и експеримента утврђени су опсези напона на свим каналима акцелерометра у случају да се акцелерометар напаја једносмерним напоном од 3.3 V као и осетљивост на сваком каналу, Табела 1.

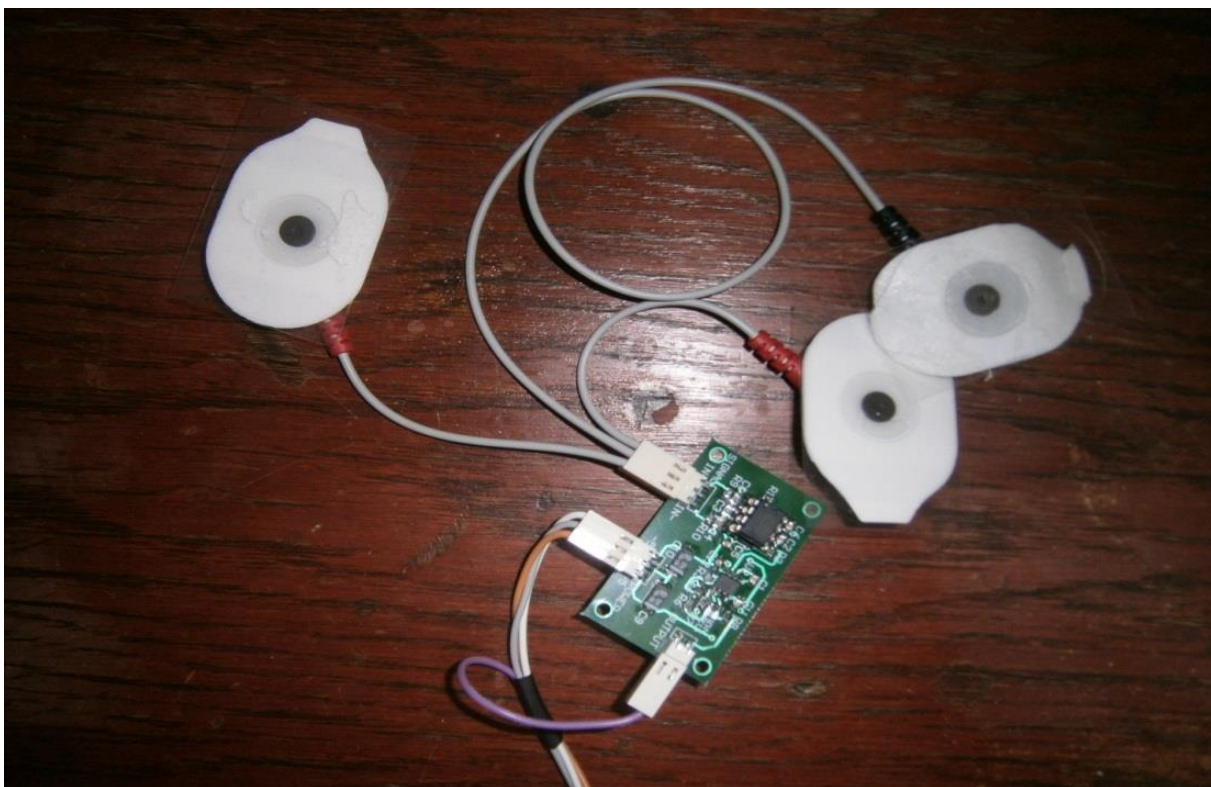
Табела 1 - Карактеристике акцелерометра по осама

Оса	Вредност „a“	Волтажа	Осетљивост
z-оса	a=0	Vz0=1.652V	Bz=0.328 V/g
	a=-g	Vzg*=1.324V	
	a=g	Vzg=1.980V	
y-оса	a=0	Vy0=1.660V	Bz=0.330 V/g
	a=-g	Vyg*=1.330V	
	a=g	Vyg=1.990V	
x-оса	a=0	Vx0=1.642V	Bz=0.3330 V/g
	a=-g	Vxg*=1.309V	
	a=g	Vxg=1.976V	

3.3.2 Опрема за мерење ЕМГ сигнала

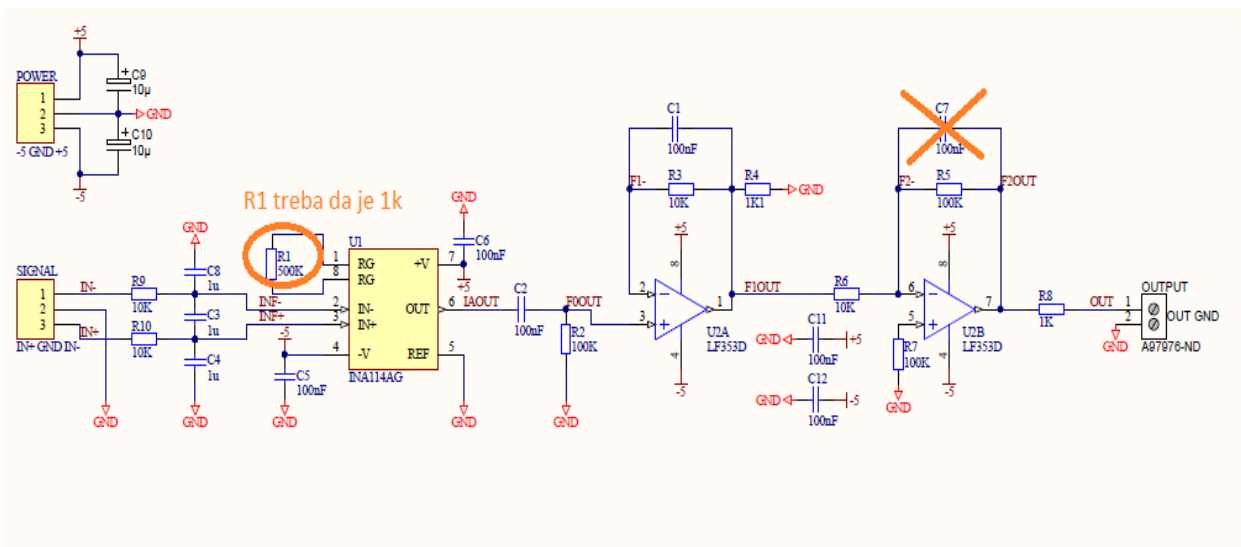
Мерење ЕМГ сигнала врши се биполарно помоћу Ag/AgCl електрода (*Skintact, Austria*) са проводним гелом. За овакво мерење ЕМГ сигнала са једног мишића користе се 3 електроде постављене према SENIAM стандарду (9). Две електроде се постављају на кожу изнад циљаног мишића док се трећа, референтна електрода поставља на неутрално ткиво, далеко од мерних електрода. Сигнали са електрода се потом воде на коло које се састоји од инструментационог појачавача и филтра пропусника високих учестаности.

Електроде као и појачавачко-филтерско коло приказани су на Слици 13.



Слика 13 - Електроде за мерење ЕМГ сигнала са појачавачко-филтерским колом

Појачавачко-филтерско коло коришћено у овом пројекту има пропусни опсег од 10Hz до 1 kHz и појачање у пропусном опсегу од 60dB. Поменуто коло је реализовано у Лабораторији за биомедицинска истраживања Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Шема кола је приказана на Слици 14.



Слика 14 - Шема појачавачко-филтерског кола

4. Опис софтвера

4.1 Lab View

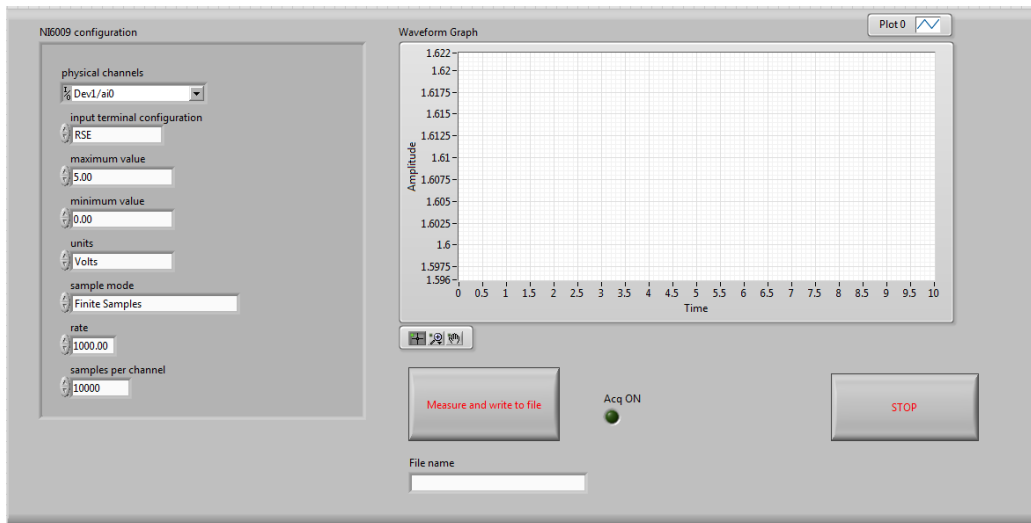
Сав софтвер за аквизицију сигнала, online и offline обраду сигнала и управљање роботском руком написан је у програмском пакету Lab View 2015 фирме National Instruments.

Lab View је графички програмски пакет, што значи да се програм не пише као текстуални фајл већ као “virtual instrument” (скраћено “VI”). VI се састоји од две кључне целине, интерфејс и блок дијаграм (енг. *Interface and block diagram*).

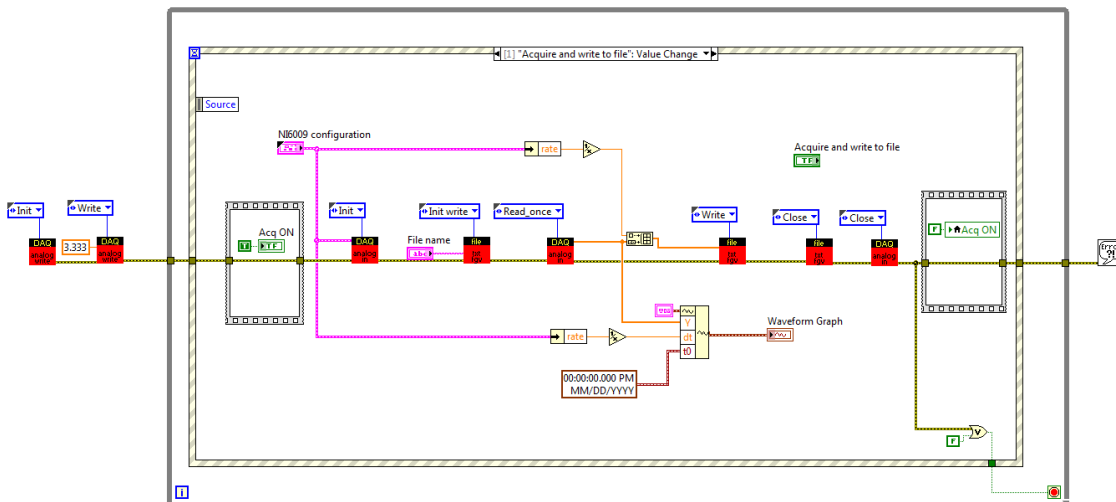
Интерфејс представља врсту HMI (тј. *Human Machine Interface*), и може садржати разне контроле и индикаторе као што су прекидачи, барови, слајдери, графици, итд. Контроле служе за управљање током извршавања програма док индикатори служе са праћење тока извршавања програма, очитавање мерених величина и слично.

Блок дијаграм садржи код који се извршава. Код се састоји од низа графичких симбола који могу имати различите улоге, од базичних математичких операција до јако сложених функција нумеричке или друге природе. Поменути графички симболи називају се Lab View функцијама.

На Слици 15 и Слици 16 приказани су блок дијаграм и интерфејс програм чија је намена аквизиција сигнала и њихово чување у фајлу за offline анализу (data_acquisition_for_offline_analyze.vi):



Слика 15 - Интерфејс data_acquisition_for_offline_analyze.vi



Слика 16 -Дијаграм data_acquisition_for_offline_analyze.vi

Предност Lab View софтвера јесте велики број уграђених функција разних намена као и бројна опрема прилагођена раду са овим софтверским пакетом.

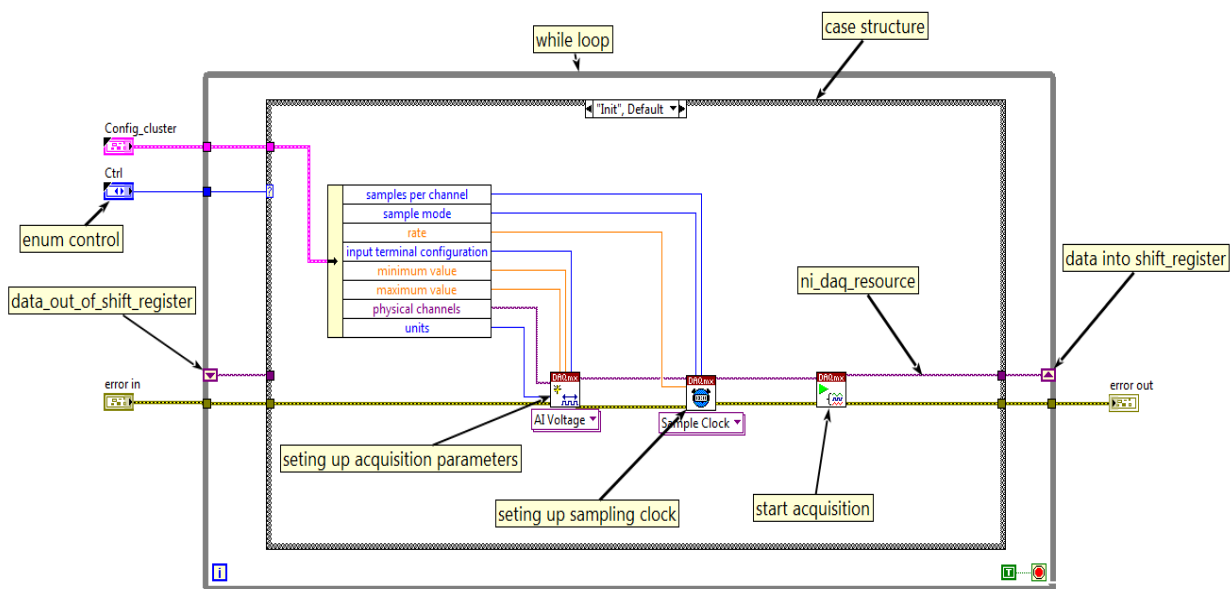
4.2 Функцијске глобалне варијабле

Функцијске глобалне варијабле представљају стил Lab View програмирања која подразумева креирање подпрограма који се састоји од while петље, case структуре, shift регистара и енумерационе контроле.

Често, у Lab View софтверу, постоје групације функције, као што је на пример DAQmx које садрже функцију којом се иницијализује процес, на пример, изабере канал на картици помоћу кога се врши аквизиција, функција за иницијализацију као повратну вредност даје „ресурс“, то јест, информације о извршеној иницијализацији која представља улаз за функцију којом се врши аквизиција самог сигнала (пружа аквизиционој функцији информације о периоди одабирања, каналу са кога се врши одабирање и слично).

Пошто је Lab View графички програмски пакет, а сигнали се између функција преносе помоћу жица, јасно је да присуство великог броја функција које комуницирају доводи до неуредности кода и губитка велике количине времена на распоређивање жица на блок дијаграму.

Сврха функцијске глобалне варијабле је чување ових ресурса и/или других података у shift регистрима while петље која се извршава само једном при сваком позиву функцијске глобалне варијабле. При следећем позиву функцијске глобалне варијабле је онда могуће прочитати из shift регистра вредност која је уписана у њега при последњем позиву функције. Case структура се контролише помоћу енумерационе контроле и сваки „случај“ ове структуре садржи одређене функције. На пример, један „случај“ може садржати функције за иницијализацију NI USB 6009 картице, ресурс који је излаз ове функције се потом чува у шифт регистру, из кога му у неком другом „случају“ приступа нека друга функција као што је функција за аквизицију података. У наредном поглављу приказана је комплетна функцијска глобална варијабла која служи за аквизицију помоћу NI6009 картице. Функцијска глобална варијабла приказана је на Слици 17.



Слика 17 - Функцијска глобална варијабла

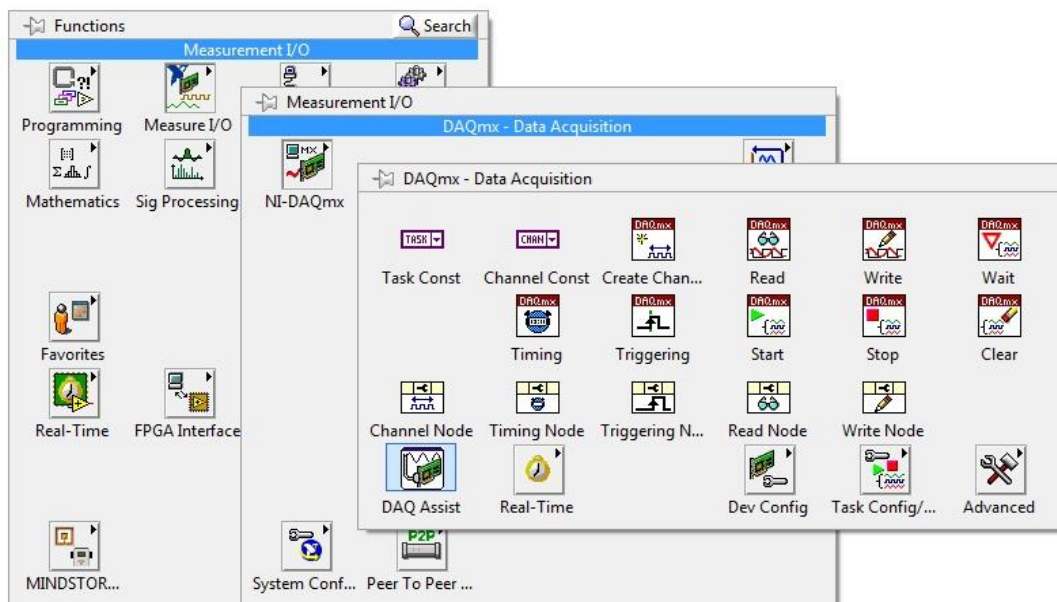
4.3 NI-DAQmx

NI-DAQmx представља низ предефинисаних LabView функција, тачније драјвера, за подешавање аквизиционе опреме коју производи компанија National Instruments, Texas.

Функције из ове групе могу се користити и за рад са NI USB 6009 картицом. NI-DAQmx омогућава подешавање параметара аквизиције са NI USB 6009 картице, као што су периоди одабирања, канали са којих се врши аквизиција, начин мерења (диференцијално, у односу на референтну вредност и сл.) и многе друге. Ови драјвери такође омогућавају контролу током аквизиције, приступ подацима који су резултат аквизиције, као и одабир формата прочитаних података.

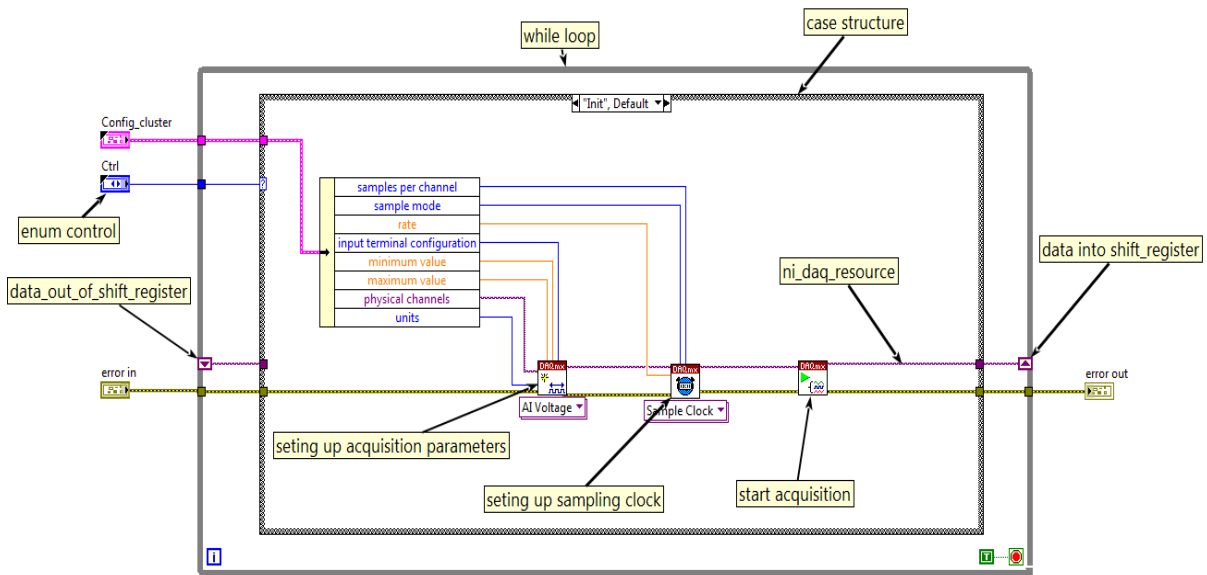
Поред аквизиције, NI USB 6009 има могућност генерисања аналогног или дигиталног сигнала помоћу аналогних и дигиталних излазних пинова. NI-DAQmx функције се користе и за конфигурацију картице за генерисање сигнала и омогућавају одабир канала, генерисање аналогног/дигиталног сигнала, подешавање параметара за генерисање сигнала као што је фреквенција сигнала, амплитуда и слично.

Функције из групе NI-DAQmx су приказане на Слици 18.

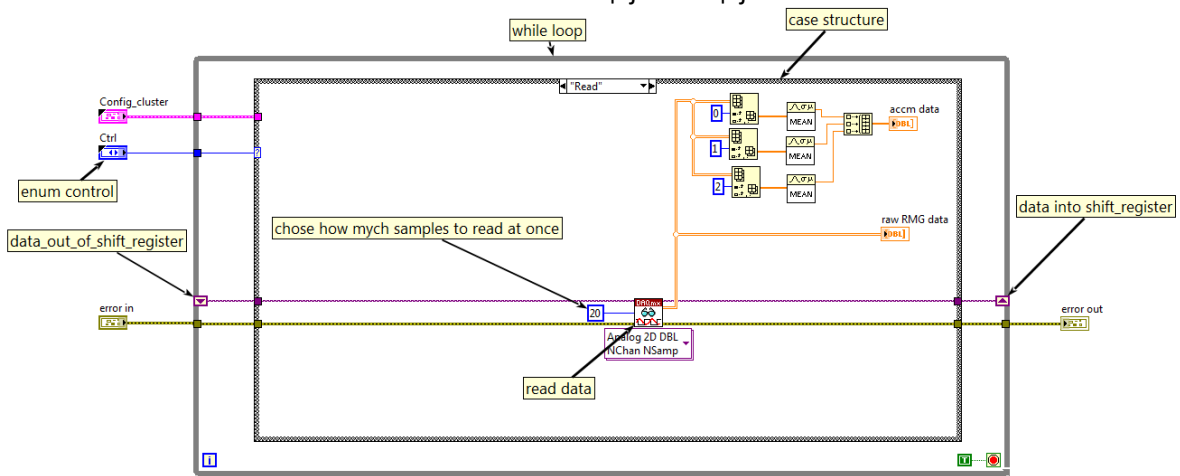


Слика 18 - Функције из групе NI-DAQmx

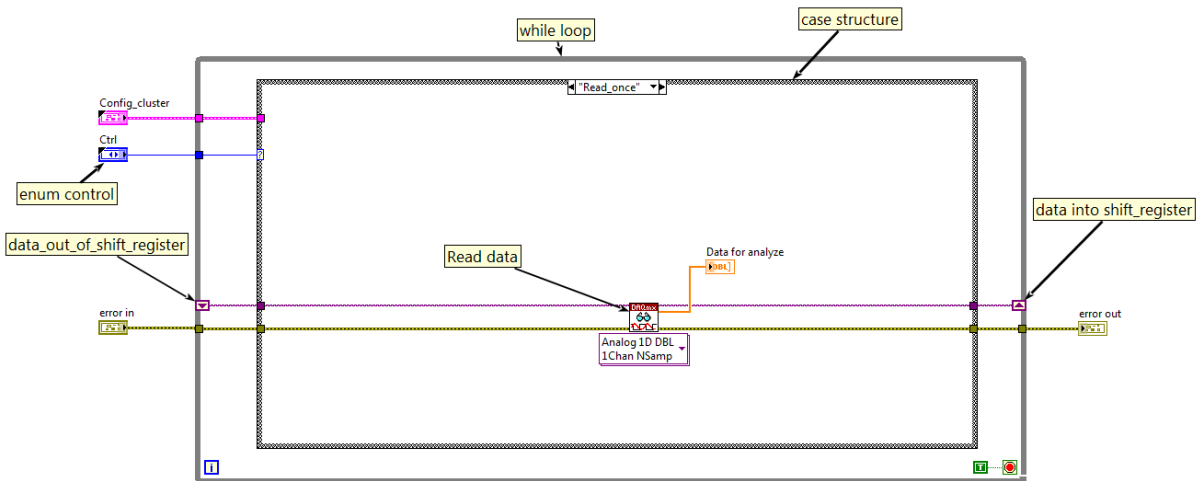
У овом пројекту је од функција из NI-DAQmx групе направљена глобална функцијска варијабла која служи за аквизицију података. На сликама 19-21 је приказана ова функцијска глобална варијабла ni_daq_analog_in.vi са свим случајевима.



Слика 19 - Иницијализација



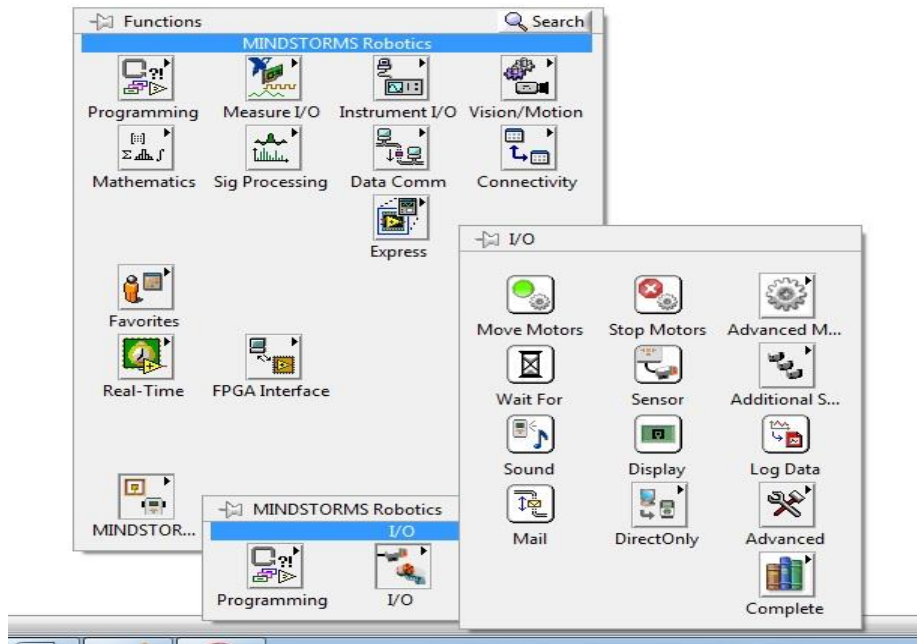
Слика 20 - Читање података са NI USB 6009 картице са више канала истовремено



Слика 21 - Читање података са NI USB 6009 картице са једног канала

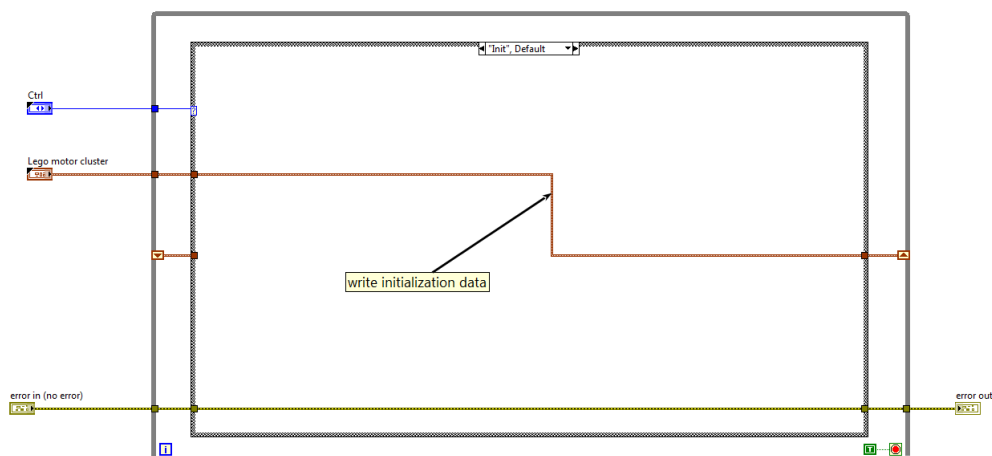
4.4 Lego NXT

За контролу Lego NXT мотора такође постоји предефинисан сет драјвера у склопу LabView програмског пакета. Палета са Lego NXT функцијама приказана је на Слици 22:

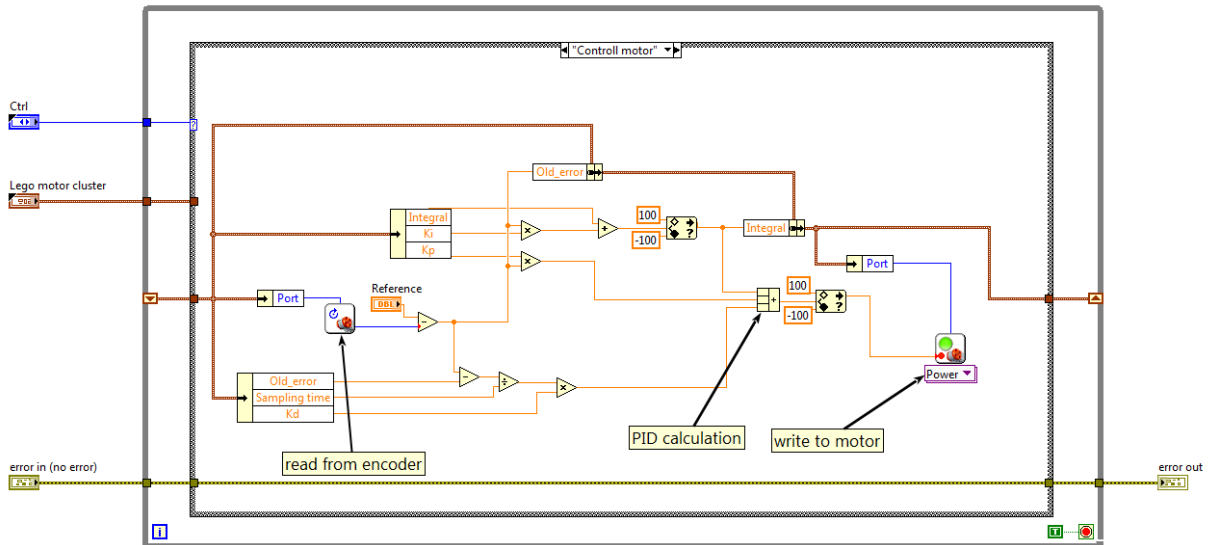


Слика 22 - Lego NXT функције

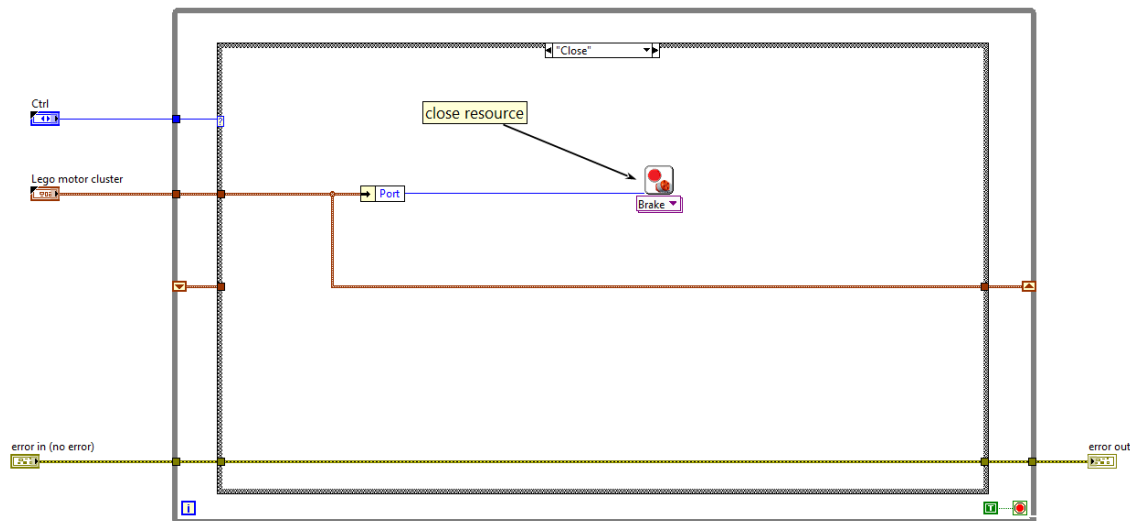
Функције из ове палете су такође организоване у функцијску глобалну варијаблу `lego_nxt_fgv.vi` која врши одабир мотора, читавање са енкодера, задавање референце као и PID контролу мотора. Случајеви ове функцијске глобалне варијабле приказани су на сликама 23-25.



Слика 23 - Иницијализација



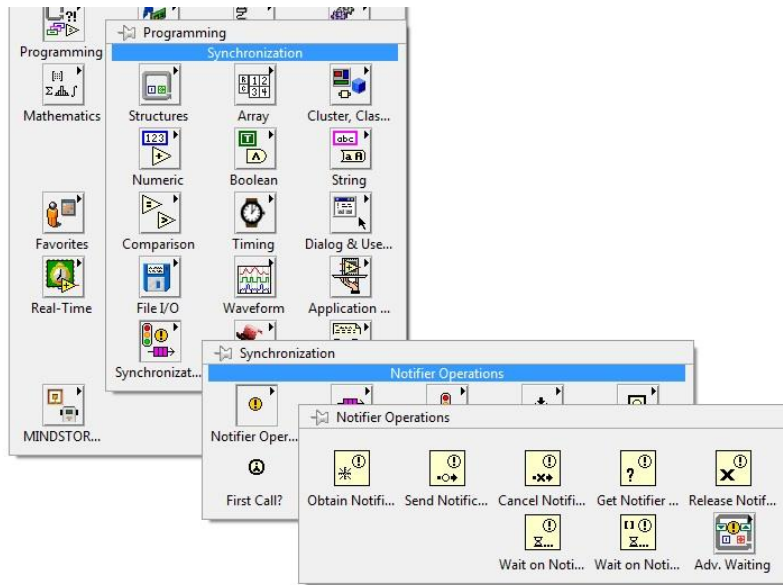
Слика 24 - Контрола мотора



Слика 25 - Ослобађање ресурса

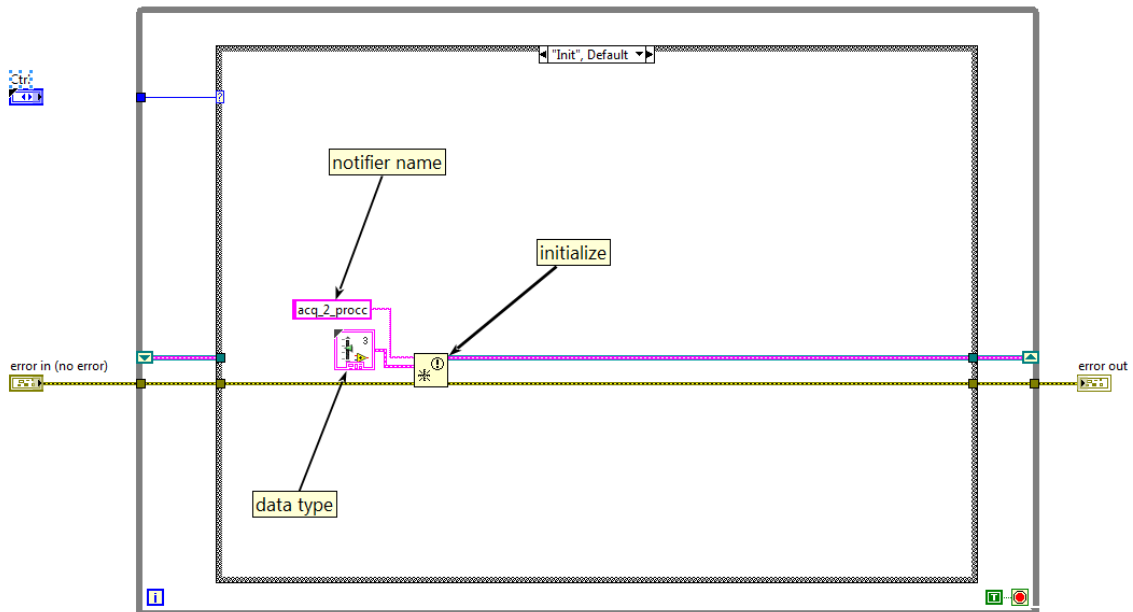
4.5 Notifier механизам

Notifier представља низ функција које се користе за асинхронно или синхронно дељење података између програмских токова (петљи) које се међусобно независно извршавају. Важна карактеристика notifier механизма је отпорност на „race condition“. У овом пројекту notifier механизам се користи за слање података из аквизиционе петље петљама које врше обраду података. Овај механизам се такође користи за слање података (референци) из процесирајућих петљи до петље која врши контролу мотора. Notifier функције су приказане на Слици 26.



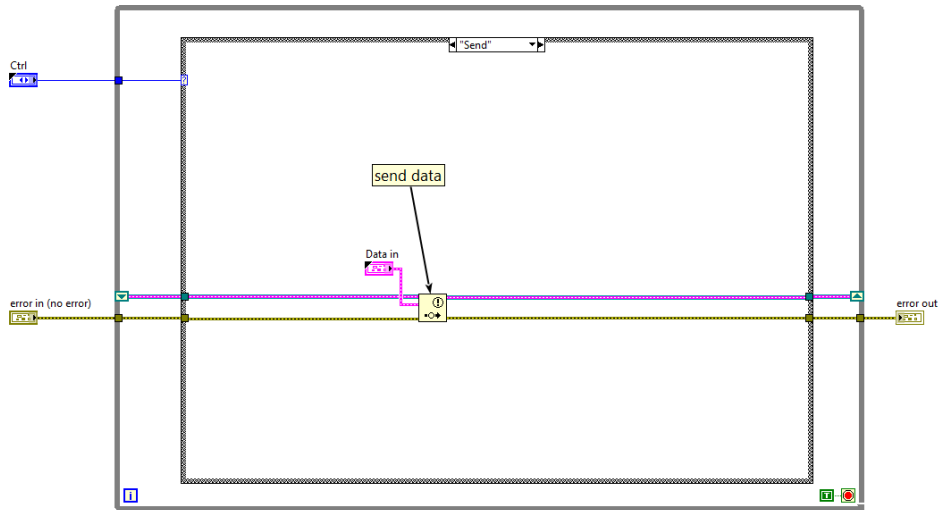
Слика 26 - Notifier функције

Notifier функције су употребљене за креирање функцијских глобалних варијабли које се користе за комуникацију између програмских петљи. Функцијска глобална варијабла `acq_to_processing_1.vi` са свим случајевима је приказана на сликама 27-30. За потребе пројекта креирано је више notifier функцијских глобалних варијабли. Све notifier функцијске глобалне варијабле имају исту структуру, разликују се једино по имену и типу података.

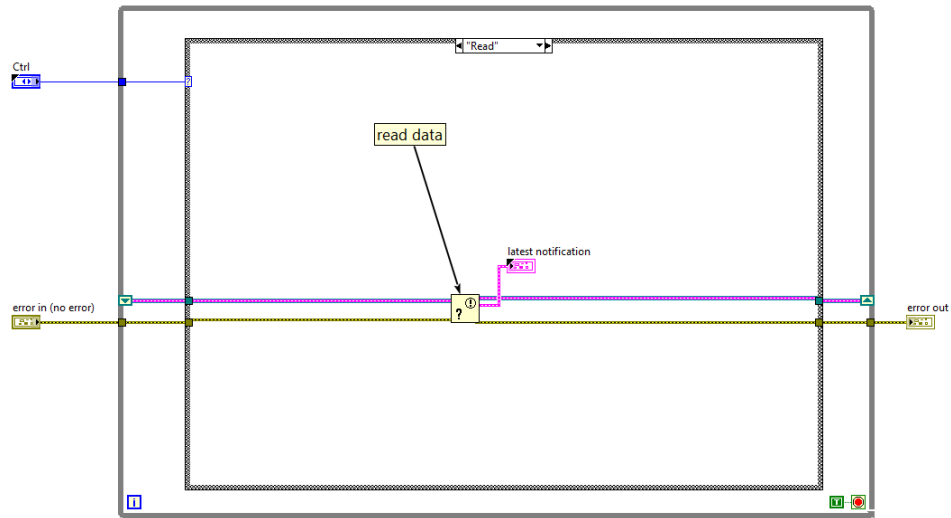


Слика 27 - Иницијализација

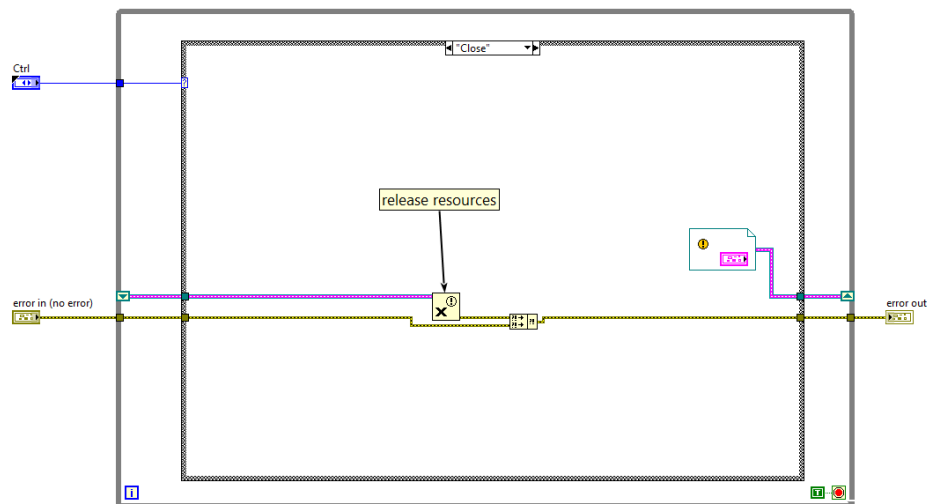
Управљање роботском руком са два степена слободе на основу електромиографских и кинематских сигнала
Далибор Вељковић



Слика 28 - Слање података



Слика 29 - Читање података

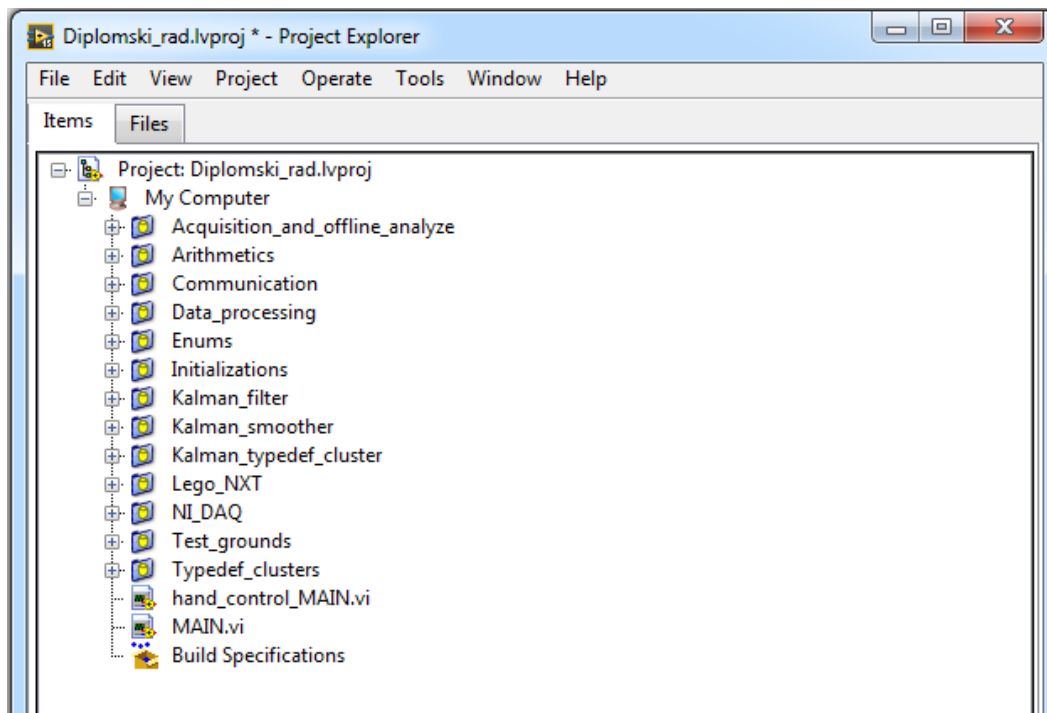


Слика 30 - Ослобађање ресурса

4.6 Lab View пројекат

У претходним поглављима наведени су најзначајнији подпрограми и механизми коришћени у овом пројекту. За потребе управљања роботске руке написано је још много подпрограма различитих функционалности који неће бити коментарисани у овом раду, информације о њиховој функционалности налазе се у документацији софтвера. Сви подпрограми налазе се у LabView пројекту Diplomski_rad.lvproj.

Подпрограми су подељени по својој функцији у групе подпрограма, свака група подпрограма чува се у засебном фајлу који је именован на основу функционалности групе. На Слици 31 је приказан пројекат са прегледом фолдера који садрже подпрограме.



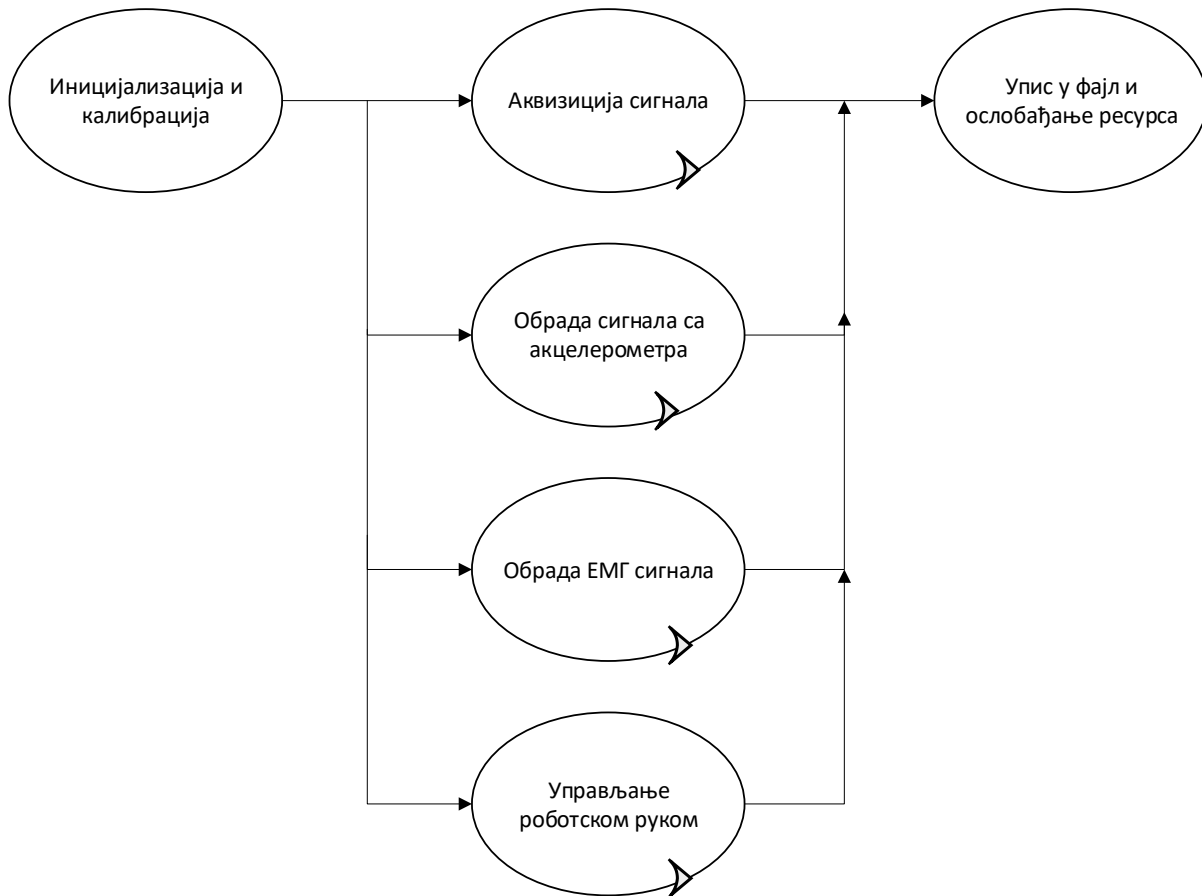
Слика 31 - Пројекат Diplomski_rad.lvproj

4.7 Главни програм за контролу роботске руке

Управљање роботском руком, аквизиција, и обрада сигнала са акцелерометра и ЕМГ сигнала врши се у програму hand_control_MAIN.vi.

4.7.1 Архитектура програма

Архитектура програма hand_control_MAIN.vi је приказана на Слици 32.



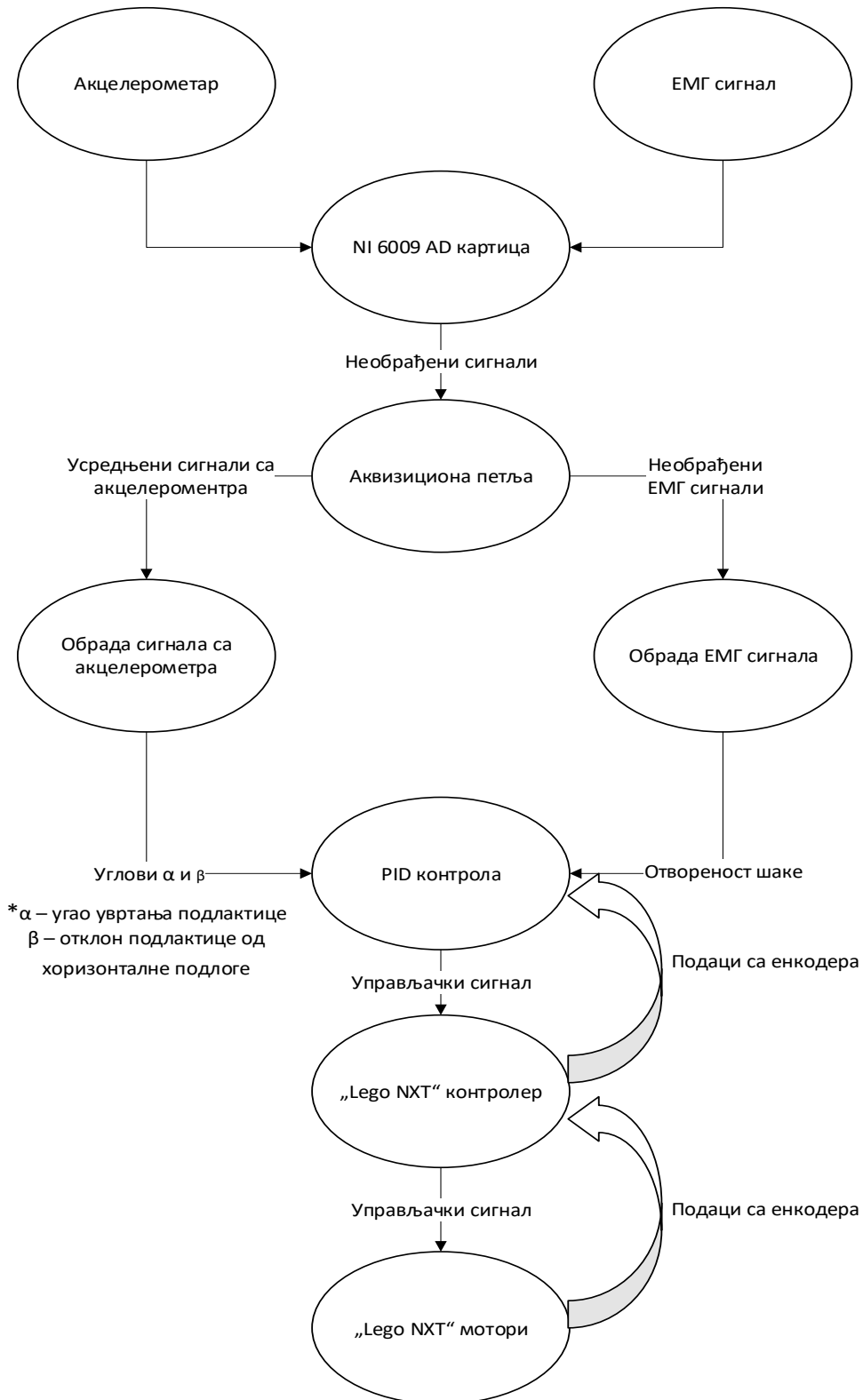
Слика 32 - Архитектура програма hand_control_MAIN.vi

Као што је приказано на Слици 32, на почетку извршавања програма врши се иницијализација, то јест, подешавање NI USB 6009 картице, лево мотора и контролера, као и читавање вредности ЕМГ сигнала при отвореној и затвореној шаци.

После иницијализације, код се извршава у 4 независне петље, прва петља врши аквизицију ЕМГ сигнала и сигнала са акцелерометра. Друга петља врши обраду сигнала са акцелерометра док трећа петља врши обраду ЕМГ сигнала, обе петље добијају податке од прве петље путем notifier механизма. Друга и трећа петља процесирањем сигнала формирају референце за управљање моторима које шаље четвртој петљи која врши управљање роботском руком.

Ток сигнала у програму приказан је на Слици 33.

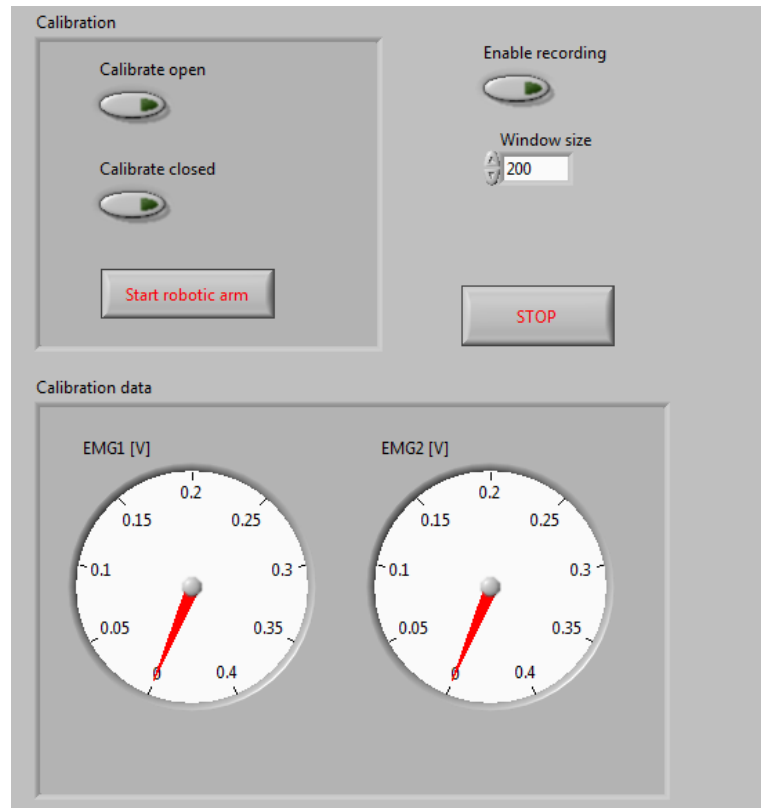
Управљање роботском руком са два степена слободe на основу електромиографских и кинематских сигнала
Далибор Вељковић



Слика 33 - Ток података

4.7.2 Интерфејс програма

Интерфејс програма је приказан на Слици 34.



Слика 34 - Интерфејс

Интерфејс садржи тастере помоћу којих се врши „калибрација“ за ЕМГ сигнал, то јест, утврђивање вредности ЕМГ сигнала са мишића подлактице при отвореној и затвореној шаци. Оваква калибрација је неопходна јер је код различитих људи другачија амплитуда ЕМГ сигнала на мишићима при отвореној и затвореној шаци.

Калибрација се врши тако што се при отвореној шаци кликне дугме „calibrate open“ а при затвореној шаци дугме „calibrate closed“.

Пре стартовања роботске руке такође треба подесити ширину прозорске функције на основу које се врши обрада ЕМГ сигнала (контрола „window size“). Још је потребно омогућити/онемогућити чување непроцесираних и процесираних података у фајл зарад касније offline анализе (контрола „Enable recording“).

По завршетки калибрације потребно је стартовати роботску руку притиском на тастер „Start robotic arm“.

5. Аквизиција и обрада сигнала

Аквизиција сигнала са акцелерометра као и ЕМГ сигнала врши се помоћу NI USB 6009 картице. Аквизиција је вршена са фреквенцијом од 1000 Hz због ЕМГ сигнала чије се битне компоненте налазе у фреквенцијоском опсегу 0-500 Hz. Мерења су вршена у Reference Single Ended (RSE) моду рада картице када се сигнали мере у односу на заједничку масу. У једној итерацији аквизиционе петље врши се аквизиција по 20 података са сваког канала понаособ.

Подаци који се добијају са акцелерометра се усредњавају и шаљу петљи за обраду сигнала са акцелерометра. Ови подаци се даље процесирају помоћу Калмановог филтра.

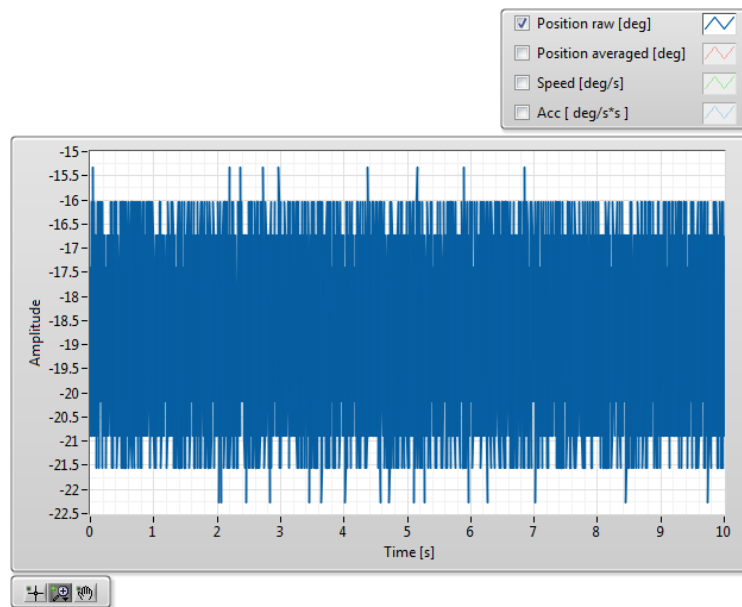
Подаци који се добијају са ЕМГ сензора се додају у „прозорску функцију“ ширине 200 одбирака. Подаци из прозорске функције се шаљу петљи за обраду ЕМГ сигнала где се врши процесирање исправљањем и усредњавањем.

5.1 Обрада података са акцелерометра

Очитавање позиције подлактице врши се помоћу акцелерометра DE-ACCM3D који је описан у ранијем тексту. Угаона позиција било које од оса акцелерометра се добија из напонског сигнала помоћу следеће формуле:

$$\text{Угао} = \frac{((V(\text{axis})0 - \text{очитан напон}) * 90)}{\text{осетљивост}}$$

Необрађен сигнал са акцелерометра приказан је на Слици 35:



Слика 35- Необрађен сигнал са ипсилон канала акцелерометра

Као што се може видети сигнал је веома зашумљен и према томе неупотребљив. Да би се сигнал могао користити за контролу роботске шаке прво се мора приступити филтрацији сигнала како би се одстранио мерни шум.

Пошто се сви сигнали одабирају фреквенцијом одабирања 1kHz (због природе ЕМГ сигнала), што је фреквенција знатно већа од потребне за одабирање сигнала са акцелерометра, а са картице се чита по 20 података на једном, први степен филтрације чини усредњавање сигнала на тих 20 одбирака. Усредњавање се врши у аквизиционој петљи и тако усредњен сигнал се шаље петљи за даљу обраду сигнала са акцелерометра где се врши даља филтрација помоћу Калмановог филтра.

5.2 Калманов филтар

Калманов филтар представља алгоритам за естимацију тренутног стања система на основу мерења са сензора и познатог модела система. У наредна два поглавља дате су теоријске основе Калмановог филтра.

5.2.1 Рекурзивни алгоритам за естимацију методом најмањих квадрата

Наведени алгоритам има намену естимације стања система на основу зашумљених мерења са сензора при чему је циљ естимирати стања тако да грешка естимација буде минимална у средње квадратном смислу.

Алгоритам је рекурзиван зато што се естимација новог стања врши на основу претходног стања и најновијег мерења са сензора.

Претпоставимо да су сва мерења (y) дата као збир линеарне комбинације стања система (x) и мерног шума. Такође, претпоставимо да је мерни шум по природи бели шум то јест, да има средњу вредност нула, да му је снага равномерно распоређена по целом фреквенцијском спектру и да је некорелисан у времену, односно да вредност сигнала шума у једном тренутку у потпуности некорелисан са вредношћу сигнала шума у неком другом тренутку.

Нека је однос између мерења и стварног стања система дат као:

$$\begin{aligned} y_1 &= H_{11}x_1 + \dots + H_{1n}x_n + v_1 \\ &\vdots \\ y_k &= H_{k1}x_1 + \dots + H_{kn}x_n + v_k \end{aligned} \quad (1)$$

Или матрично: $y = Hx + v$.

Онда рекурзивно алгоритам за естимацију стања има облик:

$$y_k = H_k x + v_k \quad (2)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k(y_k - H_k\hat{x}_{k-1}) \quad (3)$$

а средња вредност грешке естимације је дата као:

$$E(e_{x,k}) = E(x - \hat{x}_k) = (I - K_k H_k)E(e_{x,k-1}) - K_k E(v_k) \quad (4)$$

Да би овај естиматор био у потпуности одређен потребно је одредити коефицијенат K_k и начин на који се рекурзивно рачуна варијанса грешке естимације P_k .

K_k и P_k се одређују минимизацијом критеријумске функције која представља збир варијанси естимације у тренутку k .

$$J_k = E[(x_1 - \hat{x}_1)^2] + \dots + E[(x_n - \hat{x}_n)^2] = Tr P_k \quad (5)$$

P_k се одређује као:

$$P_k = E(e_{x,k} e_{x,k}^T) = (I - K_k H_k)P_{k-1}(I - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T \quad (6)$$

где R_k представља варијансу мерног шума v_k .

K_k се добија минимизацијом критеријумске функције J_k као:

$$\frac{\partial J_k}{\partial K_k} = 2(I - K_k H_k)P_{k-1}(-H_k^T) + 2K_k R_k = 0 \quad (7)$$

Одатле се добија израз за K_k :

$$K_k = P_{k-1} H_k^T (H_k P_{k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (8)$$

Сумарно, једначине рекурзивног естиматора методом најмањих квадрата:

$$\begin{aligned} K_k &= P_{k-1} H_k^T (H_k P_{k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \\ \hat{x}_k &= \hat{x}_{k-1} + K_k (y_k - H_k \hat{x}_{k-1}) \\ P_k &= (I - K_k H_k) P_{k-1} (I - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T \end{aligned} \quad (9)$$

5.2.2 Пропагирање стања и варијанси

Претпоставимо да имамо дискретан, линеаран систем:

$$x_k = F_{k-1} x_{k-1} + G_{k-1} u_{k-1} + L_{k-1} \tilde{w}_{k-1} \quad (10)$$

где је x_k вектор стања у тренутку k , x_{k-1} је вектор стања у претходном тренутку, u_{k-1} је улаз у систем (управљање на пример), док \tilde{w}_{k-1} представља случајну променљиву која утиче на процес и има карактеристике белог шума.

Средња вредност вектора X је:

$$\tilde{x}_k = E(x_k) = F_{k-1} \tilde{x}_{k-1} + G_{k-1} u_{k-1} \quad (11)$$

Из претходне две једначине следи:

$$P_k = E[(x_k - \bar{x}_k)(\dots)^T] = F_{k-1}P_{k-1}F_{k-1}^T + L_{k-1}\tilde{Q}_{k-1}L_k^T \quad (12)$$

што представља коначан израз за зависност варијансе грешке естимације у тренутку k од варијансе грешке естимације у тренутку $k-1$.

5.2.3 Једначине Калмановог филтра и принцип рада

У претходна два поглавља приказана су два алгоритма за естимацију стања. Први приступ, то јест, естимација методом најмањих квадрата рекурзивно естимира стање система на основу мерења. Други приступ, односно пропагирање стања, естимира стање само на основу модела система не узимајући у обзир мерења са сензора.

Калманов филтар комбинује ова два приступа. При естимацији стања у тренутку k прво се врши априорна процена на основу мерења у тренутку $k-1$ и модела система.

$$\hat{x}_k^- = E[x_k | y_1, y_2, \dots, y_{k-1}] = \text{априорна процена} \quad (13)$$

По аквизицији мерења врши се нова процена стања као у рекурзивној методи најмањих квадрата при чему се ново стање рачуна на основу новог мерења и априорне процене која је израчуната у претходном кораку. Тако се добија постериорна процена стања:

$$\hat{x}_k^+ = E[x_k | y_1, y_2, \dots, y_k] = \text{постериорна процена} \quad (14)$$

На основу претходног излагања добија се рекурзивни алгоритам за Калманов филтар:

1. Систем чија стања естимирамо дат је као:

$$\begin{aligned} x_k &= F_{k-1}x_{k-1} + G_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1} \\ y_k &= H_k x + v_k \\ E(w_k w_j^T) &= Q_k \delta_{k-j} \\ E(v_k v_j^T) &= R_k \delta_{k-j} \\ E(w_k v_j^T) &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

2. Иницијализујемо Калманов филтар:

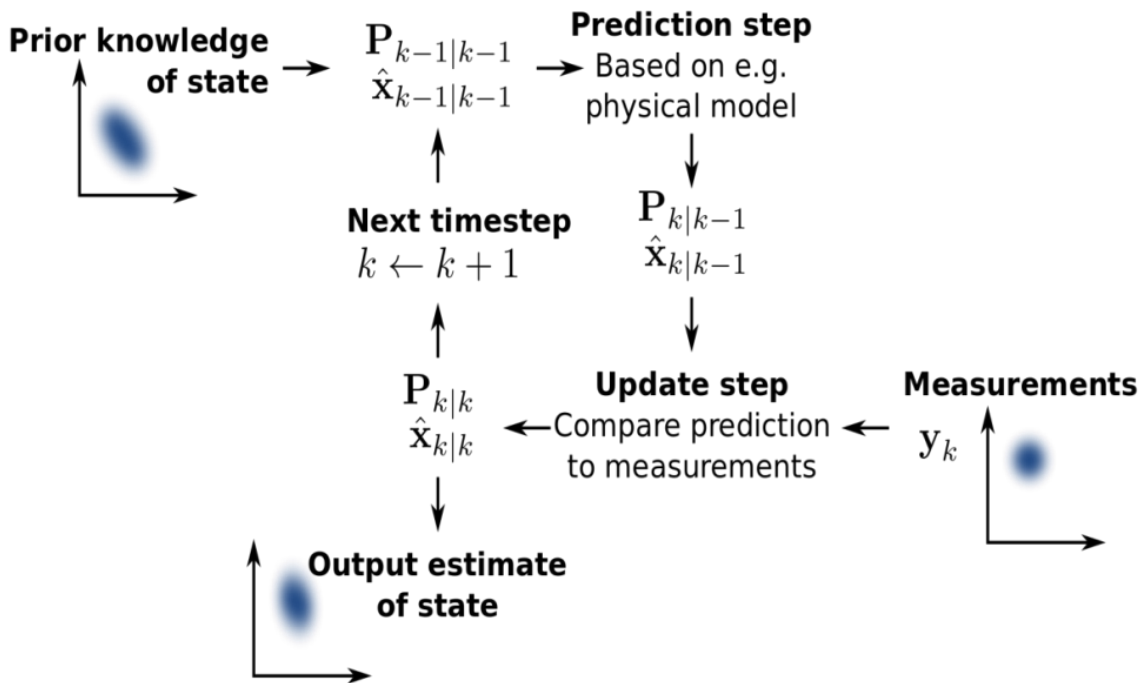
$$\begin{aligned} \hat{x}_0^+ &= E(x_0) \\ P_0^+ &= E[(x_0 - \hat{x}_0^+)(x_0 - \hat{x}_0^+)^T] \end{aligned} \quad (16)$$

3. Рекурзивни алгоритам који се примењује у сваком тренутку времена $k, k+1, \dots$

$$\begin{aligned}
 P_k^- &= F_{k-1}P_{k-1}^+F_{k-1}^T + Q_{k-1} \\
 K_k &= P_k^-H_k^T(H_kP_k^-H_k^T + R_k)^{-1} \\
 \hat{x}_k^- &= F_{k-1}\hat{x}_{k-1}^+ + G_{k-1}u_{k-1} = \text{априорна процена} \\
 \hat{x}_k^+ &= \hat{x}_k^- + K_k(y_k - H_k\hat{x}_k^-) = \text{постериорна процена} \\
 P_k^+ &= (I - K_kH_k)P_k^-(I - K_kH_k)^T + K_kR_kK_k^T
 \end{aligned} \tag{17}$$

Детаљније извођење може се наћи у (10).

Шематски приказ Калмановог филтра дат је на Слици 36.



Слика 36 - Калманов филтар (11)

5.2.4 Особине Калмановог филтра

Уколико су испуњени сви услови модела, то јест систем чија стања естимирамо је линеаран а v и w имају особине белог шума, Калманов филтар представља оптималан естиматор.

Уколико систем није линеаран и V и W немају особине белог шума, али имају средњу вредност једнаку нули, Калманов филтар представља најбоље линеарно решење за естимацију стања. Ова особина чини Калманов филтар добрим решењем за широк спектар проблема.

Функција Калмановог филтра се у суштини своди на „балансирање“ између процене стања коју даје модел, и процене стања која се добија мерењем. Калманов филтар ово „балансирање“ врши на основу варијанси варијабли V и W . Уколико је варијанса варијабли V (мерни шум) велика док је варијанса варијабли W (случајан процес који утиче на наш систем) мала, Калманов филтар ће већи значај придавати естимацији модела него процени која се добија мерењем и обрнуто.

Мана Калмановог филтра јесте велика компутациона сложеност алгоритма која расте са редом система што може представљати проблем за имплементацију овог алгоритма у реалном времену.

5.3 Филтрирање сигнала са акцелерометра

5.3.1 Начин обраде и моделирање акцелерометра

При обради сигнала са акцелерометра користе се три Калманова филтра, по један за сваки канал акцелерометра. Систем је моделиран као:

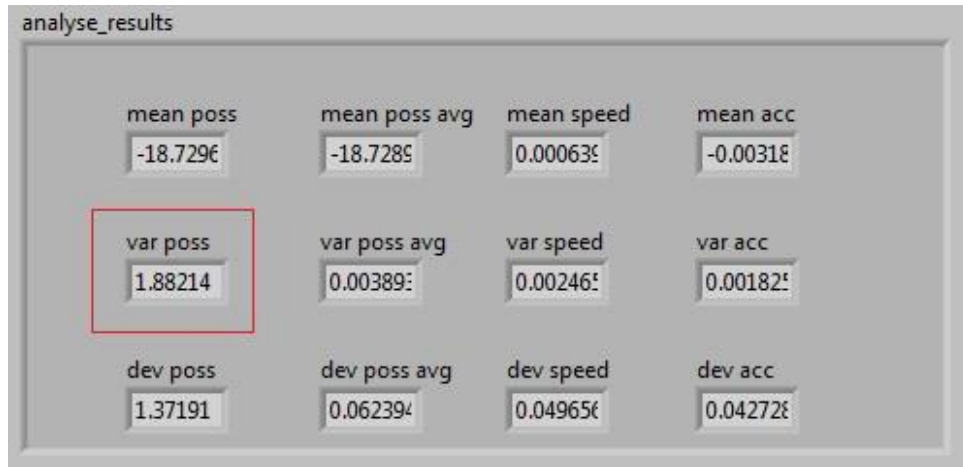
$$\begin{aligned}x_k &= \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x_{k-1} + \begin{bmatrix} T^2/2 \\ T \end{bmatrix} w'_{k-1} \\ y_k &= [1 \quad 0] x_k + v_k\end{aligned}\tag{18}$$

Где је x_k $\begin{bmatrix} \text{угаона позиција} & \text{степени} \\ \text{угаона брзина} & \text{степени/S} \end{bmatrix}$ а T време између два одбирка.

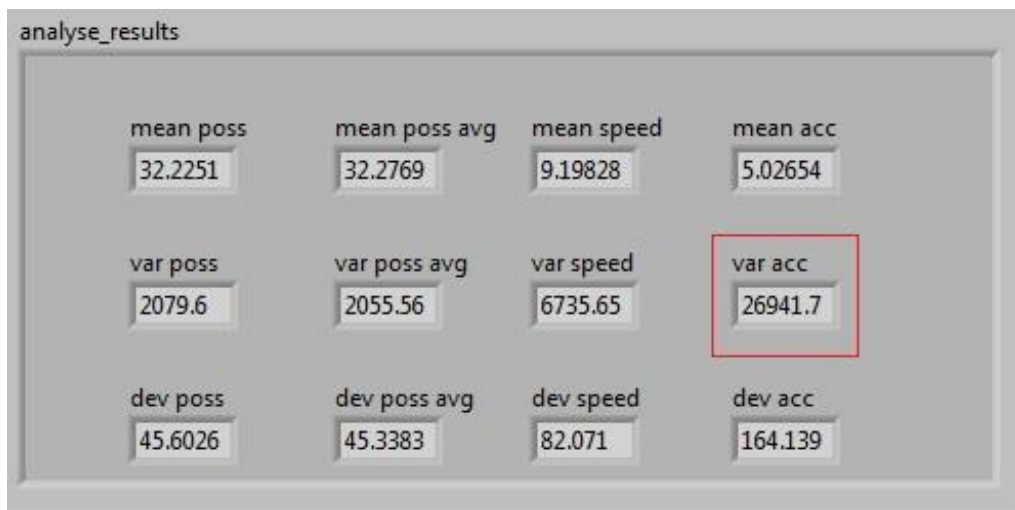
V је моделирано као бели шум, чија је средња вредност једнака нули а варијанса једнака варијанси мерења угаоне позиције док је акцелерометар у стању мировања.

W представља случајну величину која утиче на брзину и позицију система, односно случајно убрзање акцелерометра проузроковано кретањем руке. W је моделирано као бели шум чија је средња вредност једнака нули а варијанса једнака варијанси убрзања акцелерометра при насумичном кретању руке. Ова варијасна је срачуната „offline“ анализом података са акцелерометра.

Варијансе за обе наведене величине се рачунају помоћу програма за offline анализу `acsm_data_offline_analyze.vi`. Резултати анализе приказани су на сликама 37 и 38.



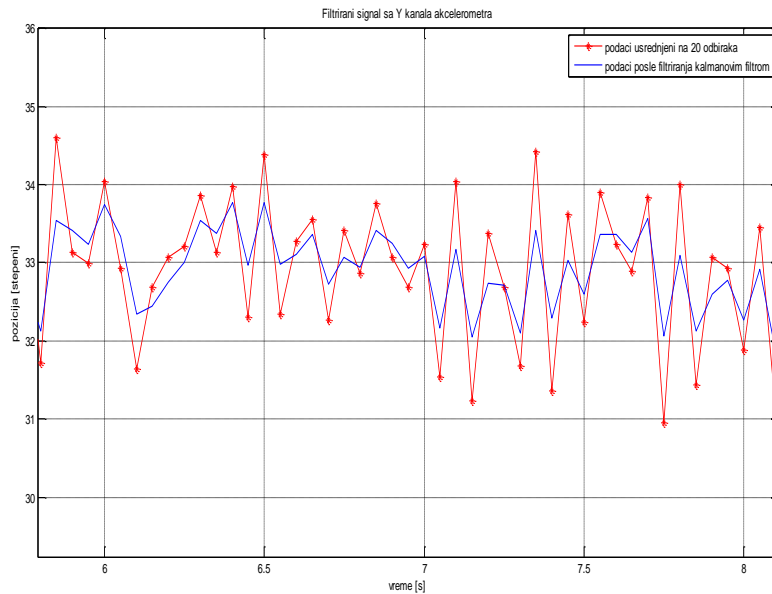
Слика 37 - Процена варијансе шума (обележена вредност изражена у степенима на квадрат)



Слика 38 - Процена варијансе убрзања (обележена вредност изражена кроз квадрат количника степена и квадрата секунде)

5.3.2 Резултати филтрације

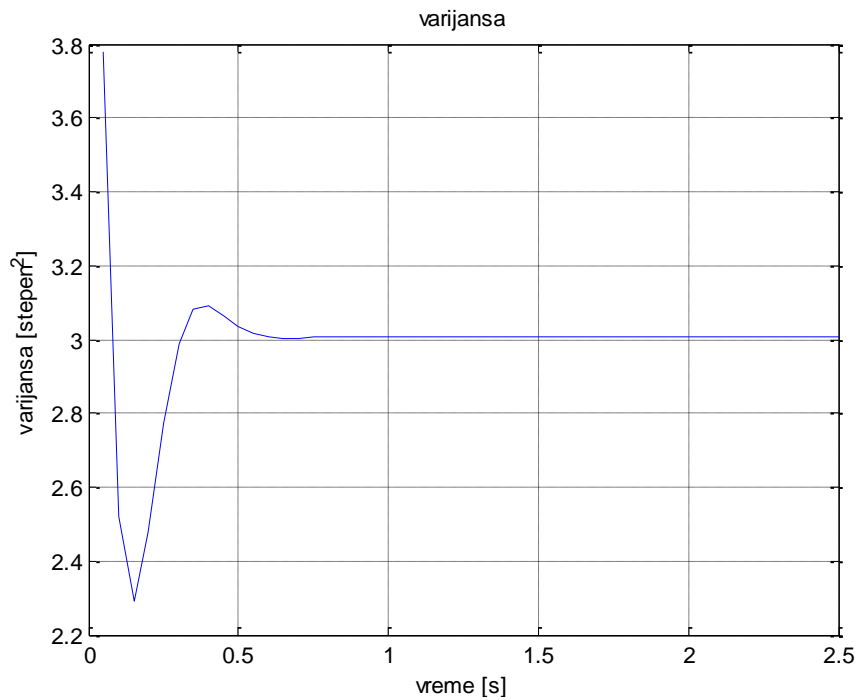
На Слици 39 приказани су резултати филтрације сигнала са Y канала акцелерометра. Подаци су прво усредњени на интервалу од 20 одбирака а потом су тако усредњени подаци филтрирани Калмановим филтром.



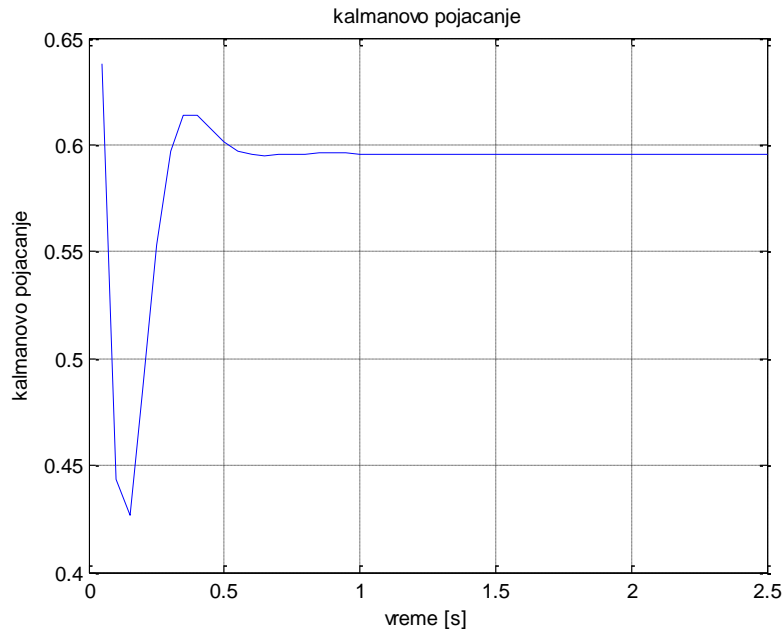
Слика 39 - Филтрирани подаци

Као што се може видети на слици усредњавање уноси побољшање у односу на необрађени сигнал, а Калманов филтар доноси додатно побољшање.

Графици варијансе грешке естимације позиције као и Калманово појачање (Kk) приказани су на Сlici 40 и Сlici 41:



Слика 40 - Варијанса грешке естимације позиције



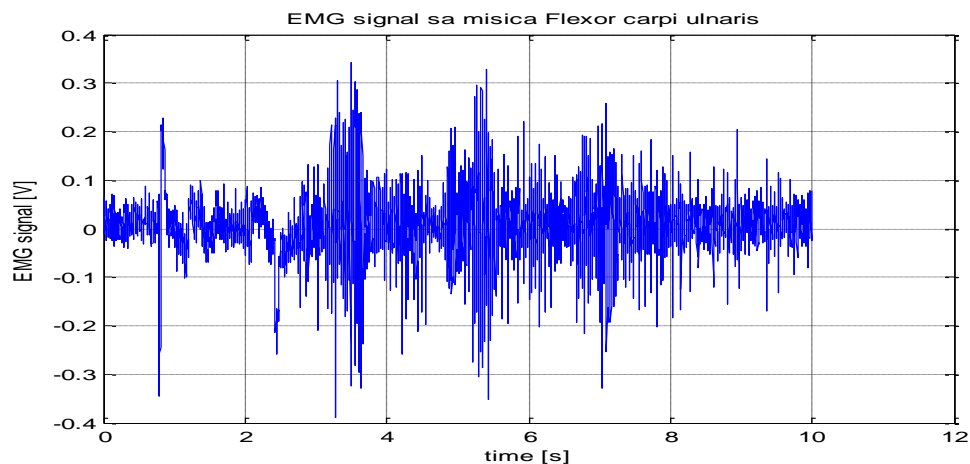
Слика 41 - Калманово појачање

5.4 Обрада ЕМГ сигнала

5.4.1 Особине ЕМГ сигнала

Електромиографија (ЕМГ) је медицинска техника за мерење електричних сигнала који активирају мишићна влакна. Електромиографија је техника која се користи за процену способности мишића да генеришу силу јер је корелисана са мишићном силом. ЕМГ сигнал мерен површинским електродама има амплитуду до око 6mV и фреквенцијски опсег 0-500Hz.

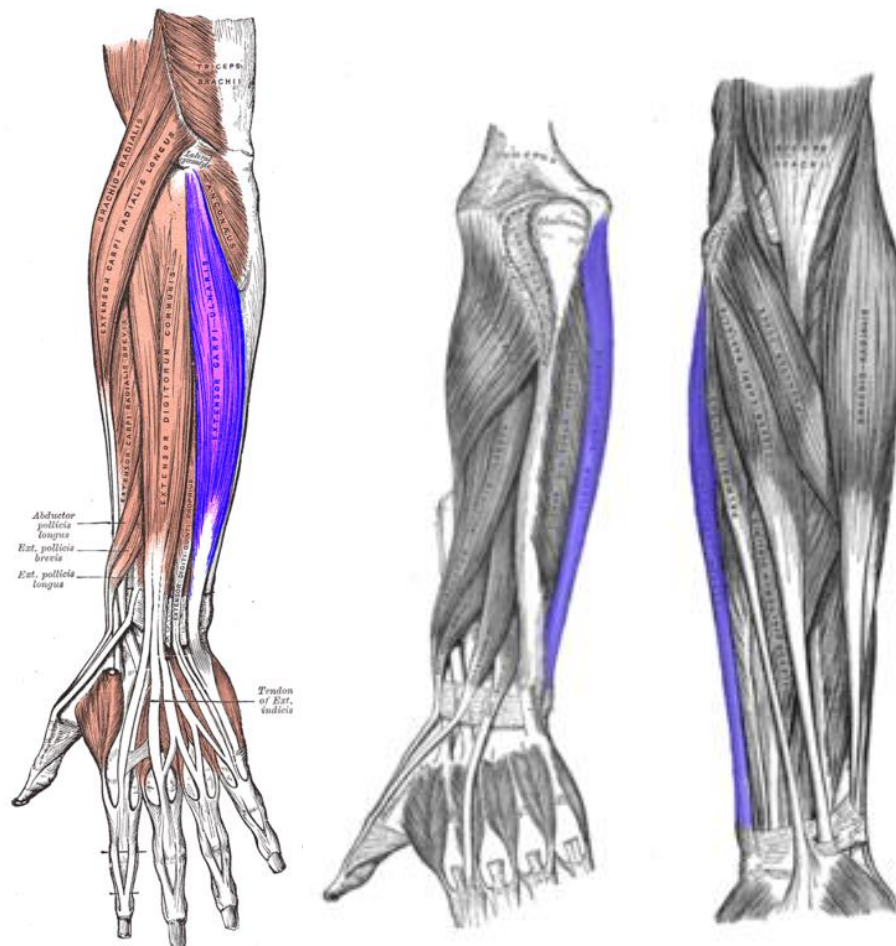
На Слици 42 приказан је појачан необрађен ЕМГ сигнал са мишића *Extensor carpi ulnaris*.



Слика 42 – Појачан необрађен ЕМГ сигнал са мишића *Extensor carpi ulnaris*

5.4.2 Аквизиција ЕМГ сигнала

За сврхе пројекта, то јест како би се детектовало отварање/затварање шаке мерен је ЕМГ сигнал са мишића *Extensor carpi ulnaris* и *Flexor carpi ulnaris*. Ови мишићи су приказани на Слици 43.

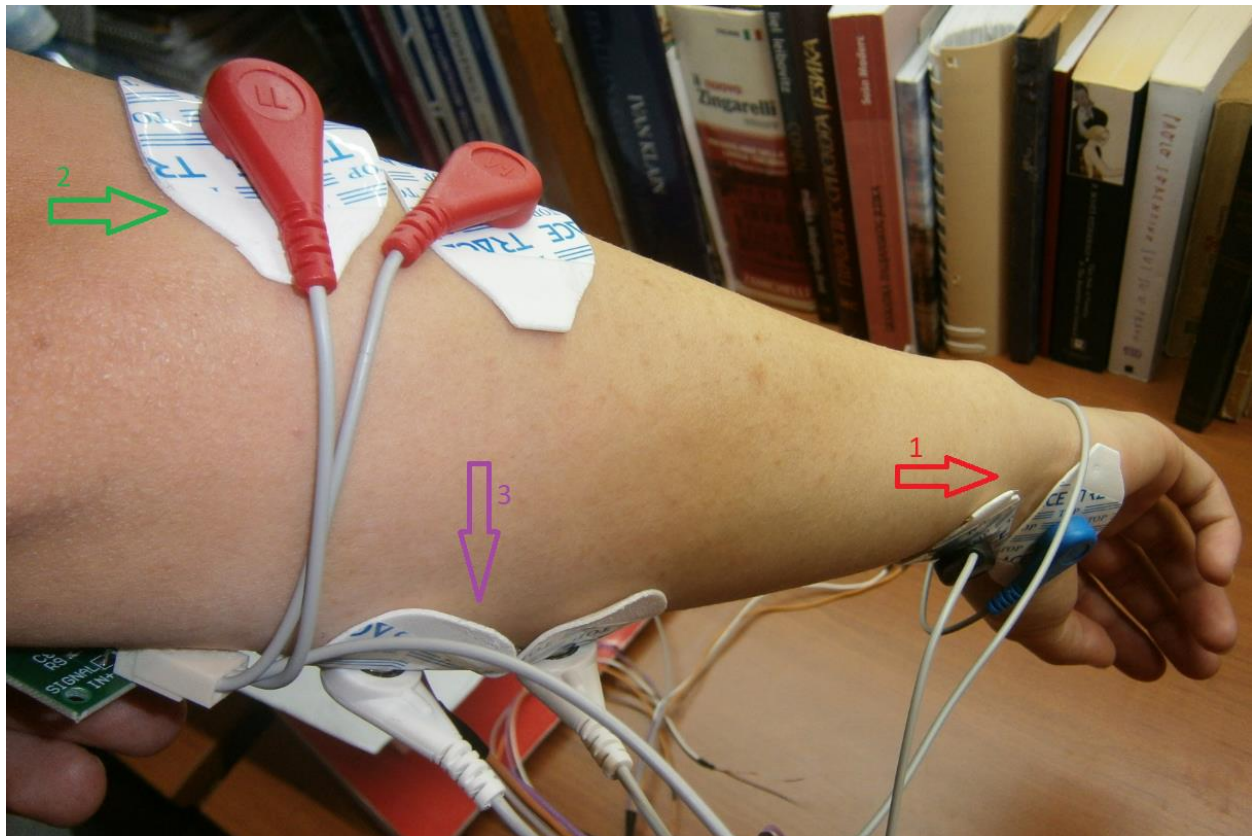


Слика 43 - *Extensor Carpi Ulnaris* i *Flexor Carpi Ulnaris*

Ова два мишића представљају пар флексор-контрактор што значи да када се један мишић контракује други се опушта и супротно.

Мишић *Extensor carpi ulnaris* се опушта при затварању шаке док се контракује при отварању шаке док за мишић *Flexor carpi ulnaris* важи обрнуто. Дакле, на мишићу *Extensor carpi ulnaris* очекује се појачана ЕМГ активност при отвореној позицији шаке док се супротно очекује за мишић *Flexor carpi ulnaris*. Управо ова информација се користи за препознавање отварања/затварања шаке.

Аквизиција ЕМГ сигнала вршена је засебно, са оба мишића. Мерење ЕМГ сигнала на сваком мишићу је вршено је диференцијално, помоћу две електроде прикључене на појачавачко-филтерско коло чије су спецификације наведене у ранијем делу рада. Улога појачавачко-филтерског кола јесте појачавање сигнала као и филтрирање филтром пропусником како би се одстранио шум и спречило померање базне линије. За мерење ЕМГ сигнала са сваког мишића неопходна је и референтна електрода која се поставља на неутрално ткиво што даље од места мерења. Поставка мерних електрода је приказана на Слици 44.



Слика 44 - Поставка мерне опреме

Бројем 1 означен је положај референтних електрода. Бројем 2 означене су електроде за мерење на мишићу *Extensor carpi ulnaris*. Бројем 3 означене су електроде за мерење на мишићу *Flexor carpi ulnaris*.

5.4.3 Обрада ЕМГ сигнала

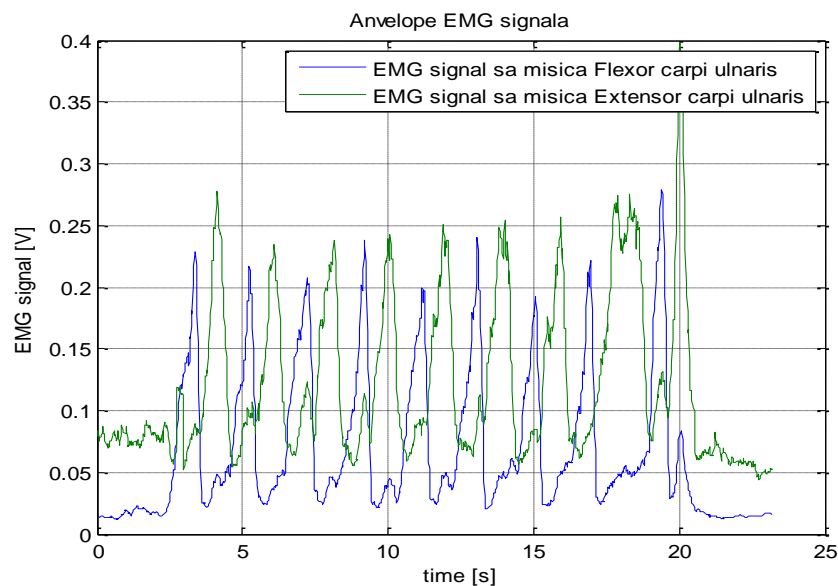
Аквизиција ЕМГ сигнала врши се NI6009 картицом, са фреквенцијом одабирања од 1000Hz. У аквизиционој петљи, у једној итерацији, прочита се 20 одбирака сигнала, ови одбирци чувају се у „прозорској“ функцији ширине 200 одбирака, односно, у сваком

тренутку чува се последњих 200 одбирака ЕМГ сигнала са оба мишића. Одбирци прозорске функције шаљу се петљи за обраду ЕМГ сигнала где се врши исправљање свих одбирака из прозорске функције а потом усредњавање свих исправљених одбирака. На овај начин се добија енvelope сигнала која носи информацију о контракцији мишића а самим тим и о отворености/затворености шаке.

Пре активирања роботске руке врши се калибрација, то јест, читавање ЕМГ сигнала са оба мишића при отвореној и затвореној шаци, помоћу ових референтних вредности и тренутних вредности ЕМГ сигнала врши се процена отворености шаке.

5.4.4 Резултати

На Слици 45 приказана је анvelope појачаног ЕМГ сигнала са оба мишића. На слици се може уочити супротна активност два мишића.



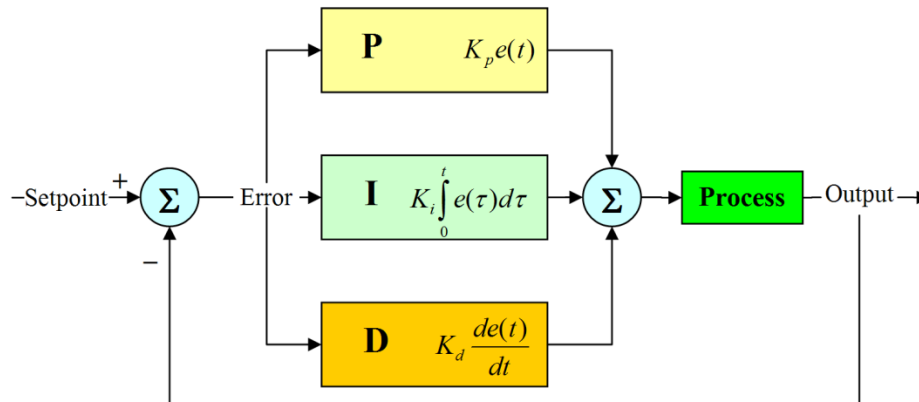
Слика 45 - Анvelope појачаног ЕМГ сигнала

6. Управљање роботском руком

Роботска рука опремљена је са 3 LegoNXT мотора који су описани у ранијем тексту. Мотори се налазе у зглобовима робота, њихова функција је описана у поглављу о хардверу. У поглављу о хардверу је приказана роботска рука а стрелицама је приказан положај мотора на руци. За сваки мотор направљен је PID контролер који се користи за управљање мотором.

6.1 PID регулација

PID регулација представља вид управљања у затвореној спреси. Шема PID контролера приказана је на Слици 46.



Слика 46 - PID контролер (12)

Улазни аргумент PID контролера јесте референтна вредност (енг. *setpoint*). На основу референтне вредности и очитавања о тренутној позицији система (мотора) формира се грешка управљања на основу које се формира управљачки сигнал.

PID контролер састоји се из три целине: пропорционалног, интегралног и диференцијалног контролера.

Пропорционални контролер формира управљачки сигнал множењем сигнала грешке константом K_p . Велика вредност константе K_p доводи до бржег праћења референце, али може довести до великих прескока у управљању или до нестабилности система. Мала вредност K_p резултује спорим праћењем референце.

Интегрално дејство акумулира сигнал грешке помножен константом K_i . Интегрално дејство је јако важно јер отклања грешку стационарног стања. Велика вредност параметра K_i доводи до бржег праћења референце али може довести до великог прескока и нестабилности система у затвореној спреси.

Диференцијално дејство рачуна тренд промене сигнала грешке и множи константом K_d . Диференцијално дејство успорава систем и смањује прескок.

6.2 Подешавање параметара PID регулатора

Параметри PID регулатора за управљање LegoNXT моторима подешени су експерименталним путем. Прво се параметри Kd и Ki поставе на нулу а параметар Kp се повећава све док се не добије одговарајућа брзина праћења референце без прескока. Потом се подешава параметар Ki како би се отклонила грешка у стационарном стању. На крају се по потреби подешава параметар Kd како би се смањио прескок.

Добијени параметри су:

Kp=3

Kd= 0.1

Ki=0.05

6.3 Задавање референце моторима

За управљање моторима помоћу PID регулатора референце се задају из петљи где се врши обрада сигнала.

За мотор означен бројем 1 на слици 46 референца се задаје као угао увртања подлактице који се рачуна као: $\alpha = \text{atan2}\left(-\frac{\psi_z}{\psi_x}\right)$, где су ψ_z и ψ_x угаони отклони оса z и x акцелерометра у односу на подлогу.

За мотор означен бројем 2 на слици 46 референца се задаје као угаони отклон y-осе акцелерометра од хоризонталне подлоге.

За мотор означен бројем 3 на слици 46 референца се задаје на основу процене отворености шаке која се врши на основу „калибрисаних“ вредности за ЕМГ сигнал са оба мишића при отвореној и затвореној шаци.

7. Дискусија и закључак

У овом пројекту успешно је реализовано управљање роботском шаком на основу кинематских и електромиографских сигнала. Успешно је извршена аквизиција ЕМГ сигнала као и сигнала са акцелерометра. Потом је извршено процесирање ових сигнала при чему је одстрањен мерни шум у довољној мери да се дати сигнали могу користити при представљању референтних вредности за управљање моторима. За обраду кинематских сигнала осмишљен је и направљен линеаран Калманов филтар док је акценат код процесирања ЕМГ сигнала стављен на одређивање амвелопе сигнала.

Бројне су могућности за унапређење реализованог система. Прва могућност унапређења је реализација система који би радио на „real-time“ платформи, уместо на лаптопу. Тиме би се добила стабилна, *stand-alone* платформа. У раду је употребљен линеаран Калманов филтар, при чему се подразумевала естимација стања линеарног система где су мерења нарушена белим шумом. У стварности, систем чија се естимација врши није линеаран нити шум има све карактеристике белог шума. Даљи развој система би укључивао и употребу нелинеарних Калманових филтара, Калманових „smoother-а“ и слично.

Литература

1. Robotic Surgery: da Vinci Versus The Ideal. *Information Week*. [На мрежи] [Цитирано: 9 септембар 2017.] <https://www.informationweek.com/healthcare/clinical-information-systems/robotic-surgery-da-vinci-versus-the-ideal/d/d-id/1112732>.
2. Stroke patients recover arm use with virtual reality. *Medical Press*. [На мрежи] 8 јун 2015. [Цитирано: 10 септембар 2017.] <https://medicalxpress.com/news/2015-06-patients-recover-arm-virtual-reality.html>.
3. HERMES, MIT's new robot that mimics human movements. *YouTube*. [На мрежи] [Цитирано: 8 септембар 2017.] <https://www.youtube.com/watch?v=eZ2vVKWiwCI>.
4. MIT HERMES Project. *Biomimetic Robotics Lab*. [На мрежи] [Цитирано: 6 септембар 2017.] <https://biomimetics.mit.edu/research/mit-hermes-project>.
5. Dongming Gan, Nikos G. Tsagarakis, Jian S. Dai, Darwin G. Caldwell, Lakmal Seneviratne. Stiffness Design for a Spatial Three Degrees of Freedom Serial Compliant Manipulator Based on Impact Configuration Decomposition. *The American Society of Mechanical Engineers*. [На мрежи] 7 јун 2012. [Цитирано: 7 септембар 2017.] <http://mechanismsrobotics.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1660675>.
6. *Robolabs*. [На мрежи] 19 јануар 2014. [Цитирано: 6 септембар 2017.] <http://yr9roboticsblog.blogspot.rs/>.
7. *National Instruments*. [На мрежи] [Цитирано: 4 септембар 2017.] <http://www.ni.com/en-us/support/model.usb-6009.html>.
8. USER GUIDE NI USB-6008/6009. *National Instruments*. [На мрежи] [Цитирано: 3 септембар 2017.] <http://www.ni.com/pdf/manuals/371303n.pdf>.
9. *Seniam*. [На мрежи] [Цитирано: 14 септембар 2017.] <http://www.seniam.org/>.
10. Simon, Dan. *Optimal State Estimation*. New Jersey : Wiley Interscience, 2006.
11. *Wikipedia*. [На мрежи] [Цитирано: 9 септембар 2017.] https://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter.
12. PID Control. *Dr.Snienecker's Tech Site*. [На мрежи] [Цитирано: 5 септембар 2017.] <https://drstienecker.com/tech-332/7-pid-control/>.

Списак слика

Слика 1 - Да Винчи асистент хирушким захватима (1).....	5
Слика 2 - Пример система за рехабилитацију (2).....	6
Слика 3 - МИТ Хермес робот (4).....	7
Слика 4 - Роботска рука	10
Слика 5 - Шема роботске руке (5).....	10
Слика 6 - Покрети људске руке	11
Слика 7- Роботска рука	12
Слика 8 - Lego NXT мотори и контролер (6)	12
Слика 9 – NI USB 6009 A/D картица (7)	13
Слика 10 - Распоред пинова (8).....	13
Слика 11 - Поставка акцелерометра и ЕМГ електрода.....	14
Слика 12 - DE-ACCM3D акцелерометар.....	15
Слика 13 - Електроде за мерење ЕМГ сигнала са појачавачко-филтерским колом	16
Слика 14 - Шема појачавачко-филтерског кола	17
Слика 15 - Интерфејс data_acquisition_for_offline_analyze.vi.....	18
Слика 16 -Дијаграм data_acquisition_for_offline_analyze.vi.....	18
Слика 17 - Функцијска глобална варијабла.....	19
Слика 18 - Функције из групе NI-DAQmx	20
Слика 19 - Иницијализација	21
Слика 20 - Читање података са NI USB 6009 картице са више канала истовремено	21
Слика 21 - Читање података са NI USB 6009 картице са једног канала	21
Слика 22 - Lego NXT функције.....	22
Слика 23 - Иницијализација	22
Слика 24 - Контрола мотора.....	23
Слика 25 - Ослобађање ресурса.....	23
Слика 26 - Notifier функције	24
Слика 27 - Иницијализација	24
Слика 28 - Слање података.....	25
Слика 29 - Читање података	25
Слика 30 - Ослобађање ресурса.....	25
Слика 31 - Пројекат Diplomski_rad.lvproj.....	26
Слика 32 - Архитектура програма hand_control_MAIN.vi	27
Слика 33 - Ток података	28
Слика 34 - Интерфејс.....	29
Слика 35- Необрађен сигнал са ипсилон канала акцелерометра	30

Слика 36 - Калманов филтар (10).....	34
Слика 37 - Процена варијансе шума (обележена вредност изражена у степенима на квадрат).....	36
Слика 38 - Процена варијансе убрзања (обележена вредност изражена кроз квадрат количника степена и квадрата секунде).....	36
Слика 39 - Филтрирани подаци.....	37
Слика 40 - Варијанса грешке естимације позиције.....	37
Слика 41 - Калманово појачање.....	38
Слика 42 – Појачан необрађен ЕМГ сигнал са мишића <i>Extensor carpi ulnaris</i>	38
Слика 43 - <i>Exstensor Carpi Ulnaris</i> i <i>Flexor Carpi Ulnaris</i>	39
Слика 44 - Поставка мерне опреме.....	40
Слика 45 - Анvelopа појачаног ЕМГ сигнала.....	41
Слика 46 - PID контролер (11).....	42

Списак табела

Табела 1 - Карактеристике акцелерометра по осама.....	15
---	----