

Sveučilište u Zadru  
Odjel za psihologiju

Adam Matić

**NEURONSKI SUSTAV ZA  
KOORDINACIJU VIDA, POKRETA I DODIRA  
ANALIZA ROBOTSKOG MODELA BAZIRANOG NA  
TEORIJI KONTROLE PERCEPCIJE**

Diplomski rad

Mentor: doc. dr. sc. Pavle Valerjev

Zadar, rujan 2014.

## **Sadržaj**

|  |    |
|--|----|
| Sažetak.....   | 1  |
| Summary.....   | 2  |
| Uvod .....   | 3  |
| 1.2. Fenomen kontrole.....   | 3  |
| 1.3. Razvoj kontrolne teorije, od klasične do moderne .....                            | 4  |
| 1.4. Kibernetika i kontrolni sustavi u ljudskom tijelu .....                           | 5  |
| 1.5. Teorije biološke motoričke kontrole.....  | 6  |
| 1.5.1. Povijest teorija biološke motoričke kontrole .....                              | 6  |
| 1.6. Teorija kontrole percepcije.....  | 9  |
| 1.6.1. Kontrola percepcije .....   | 10 |
| 1.6.2. Hjerarhijska organizacija.....  | 13 |
| 1.6.3. Biološka osnova kontrolnih procesa.....   | 14 |
| 1.7. <i>Little Man</i> model integracije vida i motoričke kontrole .....               | 17 |
| 2. Cilj, problemi i hipoteze .....   | 19 |
| 2.1. Cilj: .....   | 19 |
| 2.2. Problem i hipoteze:.....  | 19 |
| 3. Metoda .....  | 20 |
| 3.1. Konstrukcija robotskog sustava.....   | 20 |
| 3.1.1. Hjerarhija kontrolnih petlji – prva razina .....                                | 21 |
| 3.1.2. Druga razina .....  | 21 |
| 3.1.3. Treća razina .....  | 23 |
| 3.2. Instrumenti:.....   | 25 |
| 3.3. Postupak .....  | 25 |
| 3.3.1. Utvrđivanje frekvencijskih karakteristika robotskog sustava.....                | 25 |
| 3.3.2. Ispitivanje uspješnosti integracije haptičkih informacija robotskog sustava.... | 25 |

|  |    |
|--|----|
| 3.3.3. Ispitivanje razlika u uspješnosti u izvršavanju zadataka praćenja mete između robotskog sustava i ispitanika..... | 26 |
| 4. Rezultati.....  | 27 |
| 4.1. Frekvencijske karakteristike sustava .....  | 27 |
| 4.2. Ispitivanje integracije haptičkih informacija .....   | 29 |
| 4.3. Usporedba učinkovitosti robotskog sustava i ispitanika .....  | 29 |
| 5. Diskusija .....   | 31 |
| 6. Zaključak .....   | 35 |
| 7. Literatura .....  | 36 |
| PRILOG 1. Slika robotskog sustava konstruiranog u ovom istraživanju.....   | 40 |
| PRILOG 2 – Bruto rezultati frekvencijske analize robotskog sustava.....  | 41 |
| PRILOG 3. Bruto rezultati mjerenja robotskog sustava u situaciji praćenja mete koja se kreće po slučajnoj putanji.....   | 42 |
| PRILOG 4. Bruto rezultati mjerenja za ispitanika br. 4 u situaciji praćenja mete koja se kreće po slučajnoj putanji..... | 45 |

## Sažetak

Problemu mehanizama biološke motoričke kontrole pristupljeno je iz različitih perspektiva. U suvremenim pristupima ističu se teorije unutarnjih modela i teorije točke ekilibrija. Simulacije i roboti temeljeni na teorijama unutarnjih modela uspijevaju reproducirati neka ponašanja živih organizama, no kritičari ističu kako predloženi mehanizmi nisu biološki plauzibilni zbog kompleksnih kalkulacija koje mozak ne može obaviti. Modeli teorije točke ekilibrija su, diskutabilno, biološki plauzibilniji, no ne uspijevaju u zadovoljavajućoj mjeri reproducirati ponašanja ispitanika.

Teorija kontrole percepcije predlaže hijerarhiju kontrolnih petlji koje su biološki plauzibilne, te u simulacijama reproduciraju kompleksna ponašanja. U ovom istraživanju konstruiran je robotski sustav u kojemu su implementirane tri razine hijerarhije kontrolnih petlji. Robotski sustav integrira vidne, proprioceptivne i haptičke informacije, te koordinira četiri stupnja slobode robotske ruke.

Rezultati pokazuju da sustav uspješno autonomno izvršava zadatak praćenja mete na ekranu računala koristeći računalni miš uz grešku manju od 10% raspona kretanja mete za frekvencije manje od 1/16 Hz. Integracija haptičkih informacija provjerena je promjenom nagiba podloge bez mijenjanja postavki sustava, te je utvrđeno da se učinkovitost praćenja mete ne razlikuje između situacija kada je podloga horizontalna i kada je nagib podloge 30°. Ovi rezultati ukazuju na potencijal objašnjavanja nekih neuronskih mehanizama u podlozi motoričkog ponašanja i senzomotorne integracije koristeći teoriju kontrole percepcije.

Ispitana je učinkovitost robotskog sustava u odnosu na ispitanike, te je utvrđeno da su ispitanici imali statistički značajno manju grešku u zadatku praćenju mete ( $p < 0.01$ ), što ukazuje na moguća softverska i mehanička poboljšanja robotskog sustava.

Robotski sustav koji bi u potpunosti mogao reproducirati ponašanje ispitanika u zadatku praćenja mete mogao bi se koristiti kao platforma za daljnja istraživanja neuronskih struktura koje su u podlozi ljudskog senzomotornog ponašanja.

Ključne riječi: motorička kontrola, senzomotorna integracija, teorija kontrole percepcije

# Neuronal system for coordinating vision, movement and touch: analysis of a robot model based on perceptual control theory

## Summary

The problem of mechanisms of biological motor control was approached from a variety of perspectives. Contemporary approaches include internal model theories and equilibrium point theories. Simulations and robot implementations using internal models successfully reproduce some human behaviors, but critics point out that these models are not biologically plausible due to complex calculations required for their functioning. Models based on equilibrium point theories are arguably more biologically plausible; however, they do not reproduce a satisfactory range of human behavior.

Perceptual control theory proposes a hierarchy of simple, biologically plausible, control loops. Computer simulations show that these loops can reproduce complex behavior. We constructed a robot system that implements three levels of perceptual control hierarchy. The system integrates visual, proprioceptive and haptic information, and coordinates four degrees of freedom of a robot arm.

Results show that the system can autonomously do a pursuit tracking task on a computer monitor using a mouse with average error less than 10% of target range, for frequencies less than 1/16 Hz. Integration of haptic information was analyzed by varying the slope of the mouse pad without changing any parameters of the system, and we found no difference in target tracking performance when the slope was 0° and when it was 30°. These results suggest that certain neural mechanisms underlying human motor coordination and sensorimotor integration might be explained by perceptual control theory.

We compared performance of the robot system with the performance of 7 subjects in 10 target tracking tasks of different difficulty and found that the subjects were statistically significantly better in the task ( $p < 0.01$ ). These results suggest necessary improvements in the mechanical elements of the robot system.

A robot system that would reproduce subject behavior more accurately could be used as a research platform to test further models of neural structures in the basis of human motor behavior and sensorimotor integration.

Keywords: motor control, sensorimotor integration, perceptual control theory

## **Uvod**

Aktivacija mišića primarni je način na koji organizmi sa živčanim sustavom utječu na svoju okolinu. Proučavanje pokreta i načina na koji neuronski sustavi u interakciji sa receptorima, mišićima i okolinom proizvode pokret područje je koje ispituje fundamentalne funkcije živčanog sustava. Tom problemu pristupljeno je iz različitih metodoloških perspektiva, te postoji velik broj teorija koje pokušavaju objasniti motoričku kontrolu ili neke njene aspekte. Kao najbolji test ispravnosti teorija suvremenim teoretičari navode implementaciju teoretskih modela u simulacijama i umjetnim sustavima, te usporedbu njihovog ponašanja s biološkim sustavima (Wolpert i Ghahramani, 2000; Kawato, 2008).

Ljudi s lakoćom hodaju, manipuliraju objektima i izvode precizne, brze pokrete koordinirajući skupine mišića i integrirajući informacije iz više senzornih modaliteta. Te sposobnosti osobito su fascinantne ako uzmemos u obzir da biološki sustavi kao efektore koriste sustave od nekoliko stotina mišića, čiji je učinak nelinearan i ovisi o starosti i umoru; receptore koje koristi su nepouzdani i imaju dugo vrijeme latencije, a živčana vlakna relativno sporo prenose informacije (Miall, 1995). Za usporedbu, suvremeni roboti koriste linearne efektore, pouzdane i precizne senzore i vrlo brz prijenos informacija, što ih čini korisnima u izvršavanju unaprijed određenih pokreta u predvidivoj okolini, no biološki sustavi još uvijek su neusporedivo efikasniji u nepredvidivoj okolini od najnaprednijih robova (Haith i Krakauer, 2013).

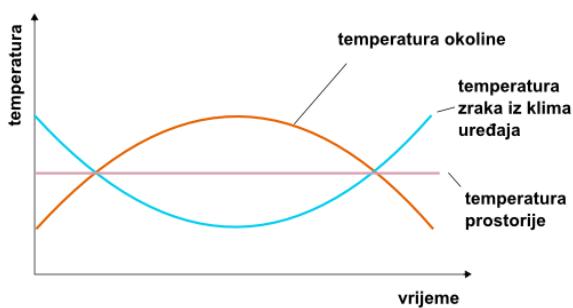
Teorija kontrole percepције (Powers, 1973, 2008) predlaže da je živčani sustav organiziran u specifičnu hijerarhiju kontrolnih petlji koja integrira senzorne informacije i koordinira pokret. Računalne simulacije ovih kontrolnih petlji uspješno izvode taj zadatak.

### **1.2. Fenomen kontrole**

Kontrolni proces, u najširem smislu, je proces u kojem se jedna varijabla održava na zadanoj razini unatoč ometajućim utjecajima iz okoline. Primjerice, klima uređaji održavaju zadanu temperaturu u prostoriji unatoč utjecajima vanjske temperature koristeći topli ili hladni zrak. Tempomati u automobilima održavaju stalnu brzinu unatoč nagibu ceste ili vjetru, povećavajući ili smanjujući tok goriva. Kod živih organizama, kontrolni procesi su prisutni u održavanju razine šećera u krvi unatoč promjenama u dostupnosti

šećera iz probavnog sustava, koristeći hormone inzulin i glukagon; ili u održavanju tjelesne temperature unatoč promjenama u vanjskoj temperaturi, varirajući stanični metabolizam.

Kontrolni procesi često se opisuju kao petlje s negativnom povratnom spregom (eng. *negative feedback loop*), budući da je djelovanje mehanizma *suprotno* djelovanju okolinskih utjecaja – kada okolina grijе prostoriju, kontrolni mehanizam će hladiti prostoriju da bi održao zadanu temperaturu (slika 1); kada je razina šećera u krvi preniska, šećer se izlučuje iz glukagonskih skladišta u jetri i mišićima; ako je temperatura organizma previsoka, kontrolni procesi potiču hlađenje znojenjem, itd.



Slika 1. Skica rada klima uređaja i varijabli u procesu regulacije temperature u prostoriji

### 1.3. Razvoj kontrolne teorije, od klasične do moderne

Kontrolna teorija je skup matematičkih alata za analizu rada kontrolnih petlji. Nastala je početkom 20. stoljeća, no tijekom povijesti, bez kontrolne teorije, konstruirano je mnogo uređaja koji su koristili negativnu povratnu spregu. Jedan od najstarijih je voden sat aleksandrijskog izumitelja Ktesibosa (oko 270. pr. Kr.) koji je održavao konstantnu brzinu protoka vode između dvije posude i tako omogućavao precizno mjerjenje vremena (prema Bennet, 1996). Arapski izumitelj al-Jazari iz 13. stoljeća opisuje slične mehanizme. Tijekom renesanse i industrijske revolucije razvijeni su regulatori temperature i automatsko usmjeravanje vjetrenjača prema smjeru vjetra, a najznačajniji izum je centrifugalni regulator brzine parnog stroja Jamesa Watta iz 1788. godine (prema Bennet, 1996). U 19. stoljeću izumljeni su servomotori, autostabilizatori i žirokompasni koji su uglavnom upotrebljavani na brodovima (prema Bissel, 2009).

Svi ti uređaji konstruirani su bez pomoći matematičke analize i često ih je bilo teško podešiti za stabilan rad i preciznu kontrolu. Veliki napredak u konstrukciji i podešavanju kontrolnih uređaja postignut je razvojem matematičke analize koja je nazvana

kontrolna teorija. Najveće zasluge pripisuju se inženjerima iz komunikacijskih tehnologija, Haroldu S. Blacku (Black, 1927, 1934, prema Bissell, 2009), koji je izumio pojačalo s negativnom povratnom spregom i matematički opisao odnose varijabli, te Harryju Nyquistu (Nyquist, 1932, prema Bissell, 2009), i Henryju Bodeu (Bode, 1940, prema Bissell, 2009) koji su matematički opisali kriterije stabilnosti petlje i izumili prikladne načine grafičkog prikaza. Vojna tehnologija u II. svjetskom ratu ekstenzivno je koristila kontrolne sustave za automatsko upravljanje protuavionskim topovima, na čijem su razvoju u SAD-u surađivali vojska, privatne kompanije i sveučilišta. Jedan od istraživača bio je Norbert Weiner koji će kasnije biti osnivač pokreta kibernetike. Istraživanja kontrolnih sustava prisutna su i u Velikoj Britaniji, Rusiji i Njemačkoj (Bissell, 2009.) Kraj rata označava kraj perioda *klasične kontrolne teorije*.

Nakon prijevoda ruskih i njemačkih radova iz područja kontrolne teorije na engleski, razvija se *moderna kontrolna teorija*, u kojoj veliku ulogu imaju digitalna računala i vrlo sofisticirane tehnike kontrole. Upotrebljava se u dizajniranju uređaja za upotrebu u zrakoplovstvu, robotici, automobilskoj industriji, kemijskoj industriji, komunikacijskim mrežama itd.

#### **1.4. Kibernetika i kontrolni sustavi u ljudskom tijelu**

Spoznaju da u živim organizmima postoje kontrolni sustavi pripisuje se Claudiu Bernardu i Walteru Cannonu (prema Cziko, 2000), a povezivanje kontrolne teorije s funkcioniranjem živih organizama pripisuje se Norbertu Wieneru (prema Cziko, 2000).

Claude Bernard, francuski fiziolog iz 19. stoljeća, smatra se utemeljiteljem znanstvene fiziologije i jedan od njegovih doprinosa je otkriće funkcije fizioloških procesa u održavanju i kontroli unutarnjih varijabli organizma (franc. *milieu interieur*). Walter Cannon, koji je radio na Harvardu, prvi je koristio je termin *homeostaza* kojega definira kao skup koordiniranih fizioloških procesa koji održavaju brojna stanja unutar organizma konstantnima ili relativno konstantnima. (Cannon, 1939, prema Cziko 2000). Bernard i Cannon nisu pružili matematičku analizu homeostatskih procesa. Matematičkim analizama su se kasnije bavili sistemski biolozi i istraživači iz srodnih disciplina.

Kibernetički pokret nastao je suradnjom fiziologa Artura Rosenbluetha, koji je bio učenik Waltera Cannona, matematičara Norberta Weinera i inženjera Juliana Bigelowa na problemu povezivanja umjetnih i bioloških kontrolnih sustava. Shvatili su da, ukoliko se

stroj treba ponašati kao čovjek, mora biti usmjeren prema nekom cilju, a to se može postići uređajima s negativnom povratnom spregom. Knjiga *Kibernetika: kontrola i komunikacija u živom biću i stroju* (Weiner, 1948) označava početak utjecajnog i obećavajućeg pokreta u kojemu su sudjelovali brojni poznati znanstvenici toga doba (Cziko, 2000).

## 1.5. Teorije biološke motoričke kontrole

Teoretski pristupi fenomenu kontrole različiti su u inženjerstvu i istraživanju biološke motoričke kontrole. U inženjerskom pristupu razvijeni su matematički alati koji su poznati pod nazivom kontrolna teorija i uključuju brojne metode analize i konstrukcije kontrolnih uređaja.

Teorije biološke motoričke kontrole bave se fenomenom kontrole u cilju usmjerjenih ponašanja ljudi i životinja. Neki suvremeni teoretičari koriste modernu kontrolnu teoriju i njene sofisticirane modele kontrole. Drugi teoretičari koriste fizikalne modele koji opisuju mišiće kao elastične opruge i izbjegavaju kontrolnu teoriju.

### 1.5.1. Povijest teorija biološke motoričke kontrole

Krajem 19. stoljeća Charles S. Sherrington (Sherrington, 1904, prema O'Brien i Bracewell, 2010) identificirao je motornu jedinicu i refleksni luk kao zajednički završni put (eng. *final common pathway*) motoričkog sustava dajući veliku ulogu proprioceptivnim povratnim informacijama u refleksnom luku. Nedugo zatim, Robert S. Woodworth (Woodsworth, 1918, prema O'Brien i Bracewell, 2010) osporava Sheringtonove nalaze predlažući teoriju impulsne kontrole za koju proprioceptivna povratna informacija nije potrebna. Time je stvoren temelj dvjema glavnim strujama koje u nešto promijenjenim varijantama postoje i danas: *paradigma dinamičkih sustava* koja objašnjava pokret uključujući interakciju proprioceptivnih povratnih informacija i *paradigma centralne kontrole* koja prepostavlja da one nisu potrebne (O'Brien i Bracewell, 2010).

Kibernetički pokret Norberta Wienera (1948) i suradnika doveo je do razmjene teorija i spoznaja iz psihologije i inženjerskih disciplina koje su proučavale i dizajnirale servomehanizme i kontrolne uređaje. Na motoričku kontrolu gleda se kao na posebni oblik servo-kontrole koja se koristila za kontrolu električnih motora, no postojali su brojni problemi sa reproduciranjem biološkog ponašanja.

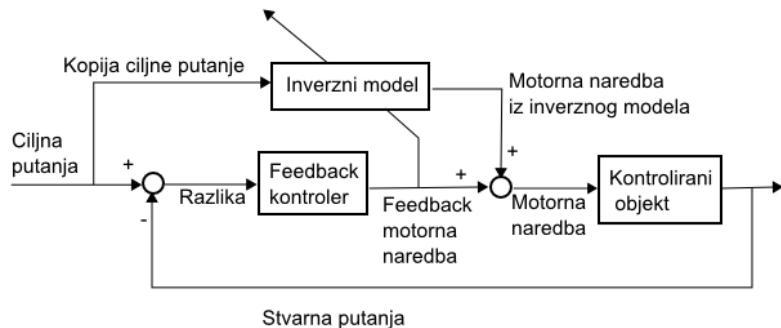
Jedan od najutjecajnijih istraživača ljudske motorike svakako je sovjetski neurofiziolog Nikolai Bernstein (1967) koji je kroz sistematsko proučavanje uočio tzv. *problem stupnjeva slobode*. Budući da se isti pokret može proizvesti na mnogo načina, odnosno koristeći različite mišiće, postoji mnogo rješenja između kojih živčani sustav odabire jedno. Problem stupnjeva slobode odnosi se na pitanje kojim procesom živčani sustav dolazi do rješenja i kako odabire koje mišiće će aktivirati za određeni pokret. Bernstein je predložio hijerarhiju dinamičkih sustava koji u interakciji s mišićima, skeletom i okolinom proizvode pokrete.

U drugoj struji, teorije centralne kontrole ojačale su s napretkom kognitivne perspektive u psihologiji. Utjecajne su teorije motornih programa i motornih shema koje prepostavljaju da je slijed mišićnih aktivacija potpuno definiran prije samog pokreta i ne ovisi o povratnoj informaciji iz okoline (Latash, 2012). Centralna kontrola korištena je u robotici, no mnogi kritiziraju biološku plauzibilnost ovih teorija kao i manjak sposobnosti prilagođavanja ponašanja promjenama u okolini.

#### 1.5.2. Suvremeni pristupi

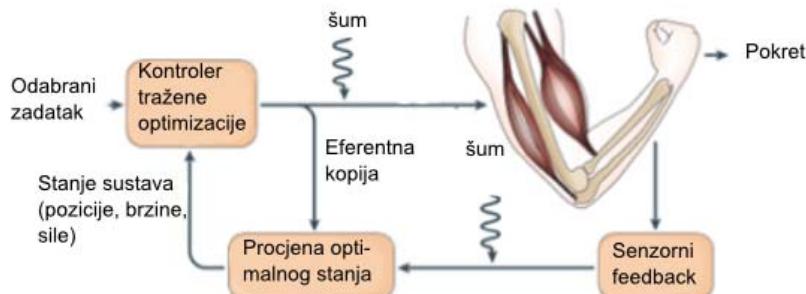
Neki suvremeni pristupi u polju biološke motoričke kontrole blisko su vezani uz inženjerske pristupe i matematičku analizu fenomena kontrole u strujnim krugovima i elektromehaničkim uređajima, a uključuju teorije unutarnjih modela i optimalne kontrole. Bitnu alternativu koja ne koristi kontrolnu teoriju predstavlja teorija točke ekvilibrija.

Teorije unutarnjih modela (Kawato, 1987; Wolpert, 1998) su izrazito kompjutacijski orijentirane. Prepostavljaju postojanje inverznih modela muskulo-skeletalnog sustava (slika 2) koje živčani sustav koristi kako bi izračunao potrebne naredbe mišićima i prediktivnih (*forward*) modela koji se koriste za predviđanje ishoda nekog pokreta. Unutarnji modeli, prema Kawato (1987), sadrže matematički točan opis dinamike mišića i nužni su za stabilizaciju bioloških kontrolnih sustava koji bi zbog sporosti prijenosa informacija kroz živčana vlakna bez unutarnjih modela bili nestabilni. Postoje neke indikacije da se unutarnji modeli nalaze u malom mozgu (Schweighofer, Arbib i Kawato 1998), no nije sasvim jasno kako matematički točni modeli mogu nastati u mozgu.



Slika 2. Sustav kontrole mišića s inverznim modelom (prema Kawato, 2003)

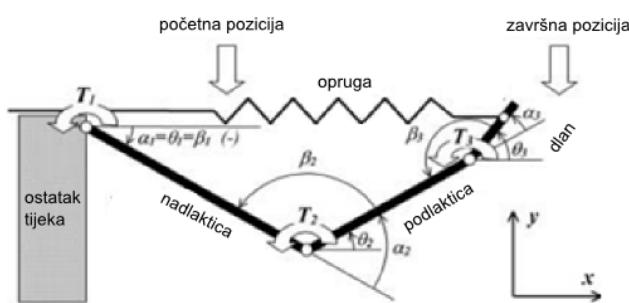
Teorija optimalne kontrole (Todorov i Jordan, 2002; Scott, 2004) u mnogim segmentima je kompatibilna s teorijom unutarnjih modela. Osnovna ideja u tehnikama inženjerske optimalne kontrole je izračunati potreban kontrolni signal u sustavu s poznatom dinamikom, uvezši u obzir postavljena ograničenja. Ista tehnika pripisuje se biološkim sustavima, a moguća ograničenja koja postavlja mozak su optimiziranje korištenja energije, minimaliziranje trzanja u pokretu, maksimalna preciznost pokreta ili slično (slika 3).



Slika 3. Dijagram sustava koji implementira optimalnu kontrolu ( prema Scott, 2004).

Snaga teorija unutarnjih modela i optimalne kontrole je što uspijevaju reproducirati na simulacijama i umjetnim sustavima neke aspekte ljudskog motoričkog ponašanja, no kritičari ističu kako je izuzetno teško prikupiti i održavati precizne modele dinamičkih sustava, čak i za jednostavne umjetne sustave sa potpuno poznatim parametrima, dok je taj proces praktički nemoguć za promjenjive biološke sustave (Latash, 2012). Ukratko, predloženim modelima nedostaje biološke plauzibilnosti jer mozak nema sve potrebne informacije koje modeli zahtijevaju za rad i ne može ih adekvatno procijeniti. Čak i kada bi mogao prikupiti sve podatke, predloženi kompjutacijski procesi vjerojatno ne mogu biti izvršeni u biološkim neuronskim sustavima (Turvey i Fonseca, 2009).

Teorija točke ekvilibrija doživjela je nekoliko revizija (Feldman 1966, 1986; Feldman i Levin, 1995). U objašnjenje pokreta uključuje promjene u dinamičkim svojstvima mišića koje analizira kao elastične opruge, te izbjegava korištenje unutarnjih modela u kontroli mišića i uopće kontrolne teorije (slika 4). Proponenti navode kako se radi o biološki plauzibilnijoj alternativi teorijama unutarnjih modela (McIntyre i Bizzi, 1993; Latash, 2012), no kritičari ističu neslaganje s eksperimentalnim podacima, nejednoznačno definirane pojmove, te nužnost definiranja mišićne dinamike kod implementacije teoretskog modela u umjetnim sustavima (Gottlieb, 1998; Gomi i Kawato, 1997; Hinder i Milner, 2003).



Slika 4. Proces pokretanja ruke prema teoriji točke ekvilibrija (prema Cesari i sur., 2001)

## 1.6. Teorija kontrole percepcije

Teorija kontrole percepcije (poznata kao *perceptual control theory* ili PCT; Powers, Clark i McFarland, 1960; Powers, 1973, 2008) kao opću arhitekturu neuronskih sustava predlaže hijerarhijski organizirane kontrolne petlje koje pojedinačno izvršavaju jednostavne procese, no u cijelini su sposobne za kompleksna adaptivna ponašanja. Nastala je kao pokušaj unapređivanja ideja iz kibernetičkog pokreta. Teorija predlaže funkcionalne modele neuronskih sustava koji se implementiraju kao računalne simulacije i uspoređuju s ponašanjem ispitanika. Dosadašnja istraživanja u eksperimentalnoj psihologiji (Powers 1978, 1989, 1992; Marken 1986, 2001, 2002, 2005; Bourbon 1995) pokazuju impresivnu uspješnost modela u reproduciranju ponašanja ispitanika, pri čemu se dobivaju visoke korelacije računalnih simulacija i ljudskog ponašanja (u ovim istraživanjima  $r > 0.95$ ).

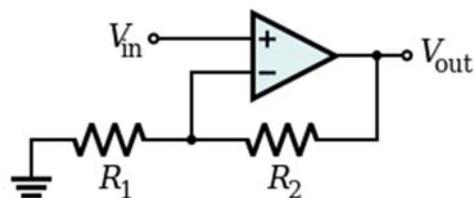
Teorija se također primjenjuje u razvojnoj psihologiji (van de Rijt-Plooij i Plooij, 1984, 1993), psihoterapiji (Mansell 2008; Carey 2008a, 2008b), sociologiji (McLlland,

1994) i robotici (Young, 2000). Radi se o relativno malom broju istraživača i izdanih radova, no raznolikost područja primjene govori mnogo o opsegu i korisnosti teorije.

Temeljni koncepti uključuju kontrolu percepcije i hijerarhijsku organizaciju kontrolnih petlji.

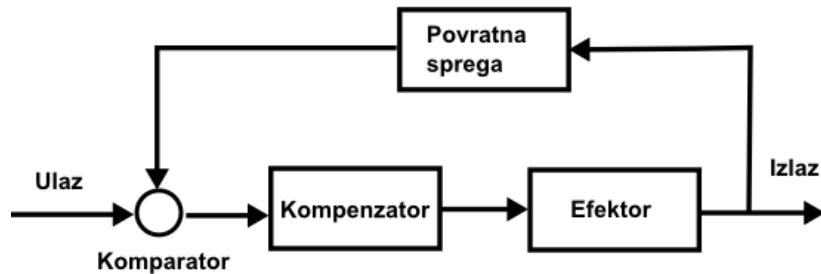
### 1.6.1. Kontrola percepcije

Kada se kontrolna teorija primjeni na žive organizme, potrebno je odrediti koji elementi organizma odgovaraju elementima inženjerskog dijagrama. Slika 5 prikazuje tipičan dijagram operacijskog pojačala u negativnoj povratnoj sprezi. Operacijsko pojačalo (trokut na slici) ima pozitivan i negativan ulazni signal. Dio izlaznog signala  $V_{out}$  preko otpornika  $R_2$  se vraća na negativni ulaz (-). Variranjem izlaza  $V_{out}$  uređaj održava negativni ulaz jednak pozitivnom ulazu i to svojstvo čini da izlaz  $V_{out}$  varira sukladno ulazu  $V_{in}$  za određeni raspon frekvencija. Uređaji ovog tipa koristili su se prvotno za poboljšanje prijenosa signala u telekomunikacijskim mrežama (Black, 1937., prema Powers 1973).



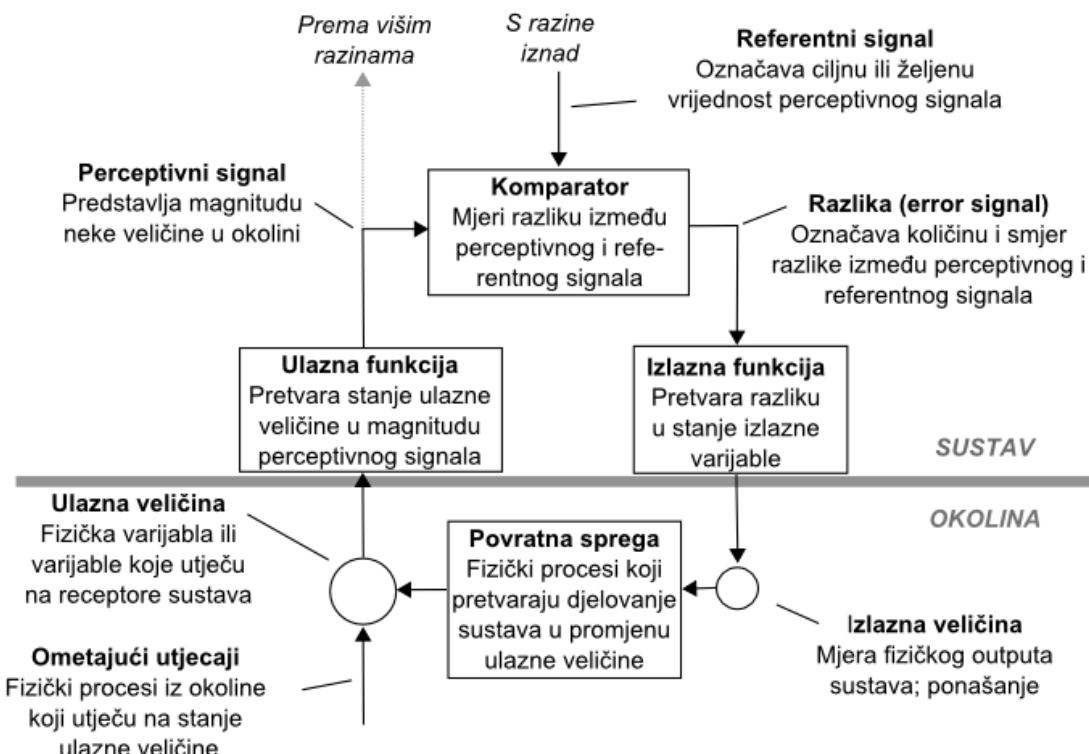
Slika 5. Dijagram operacijskog pojačala u negativnoj povratnoj sprezi.

Primjena kontrolne teorije na žive organizme započela je u kibernetici sredinom prošlog stoljeća. Dijagram koji predlaže Wiener (slika 6), moguće je različito tumačiti jer nije jednoznačno određeno kako se elementi kontrolne petlje odnose prema elementima organizma. Budući da nije jasno određena granica organizma i okoline, *Ulas* se obično tumači kao senzorni ulaz, a *Povratna sprega* kao proces unutar organizma (Powers, 1989). Drugdje, primjerice u inženjerskoj psihologiji, grani ergonomije koja istražuje ljudske sposobnosti kako bi dizajnirala optimalne industrijske alate i procese, *Povratna sprega* i *Komparator* se tumače kao procesi u okolini, a organizam stavlja u ulogu *kompenzatora* (Powers, 1989).



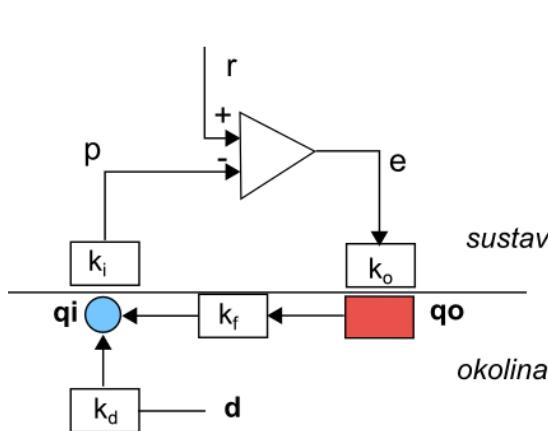
Slika 6. Dijagram kontrolnog sustava (prema Wiener, 1948, p 132)

Termin *kontrola percepције* naglašava specifičnu primjenu inženjerskog dijagrama na živa bića (slika 7), različit od kibernetičkog dijagrama. Komparator se nalazi unutar organizma i implementiran je u živčanim stanicama. Signali koji dolaze iz receptora (perceptivni signali) analogni su signalu na negativnom ulazu komparatora, dok je pozitivni ulaz komparatora signal koji dolazi iz viših centara živčanog sustava. *Povratna sprega* dio je okoline i označava fizičke procese koji pretvaraju djelovanje ponašanja na ulaznu veličinu. Naslov knjige *Behavior: the control of perception* (Powers, 1973) izražava osnovnu ideju da organizmi variraju ponašanje kako bi održali perceptivne signale jednake referentnim signalima unatoč ometajućim utjecajima iz okoline, kao što operacijsko pojačalo u negativnoj povratnoj sprezi varira  $V_{out}$  da bi održalo pozitivni i negativni ulaz jednakima.



Slika 7. Elementi kontrolne petlje, prema Powers (2008)

Kontrola percepcije također se naziva *kontrola ulaza* (*control of input*, Powers, 1973) kako bi se naglasilo da petlja ne kontrolira svoj izlaz, tj. ne postoji referentna razina izlaza, nego samo referentna razina ulaza – izlaz *varira* dok se ne izjednače pozitivni i negativni ulaz. Perceptivni signal je varijabla koju petlja kontrolira koristeći izlaz, tj. ponašanje.



|                |                                     |
|----------------|-------------------------------------|
| p              | – perceptivni signal                |
| r              | – referentni signal                 |
| e              | – razlika p i r (error)             |
| q <sub>o</sub> | – izlaz sustava (ponašanje)         |
| q <sub>i</sub> | – ulazna veličina                   |
| d              | – utjecaji iz okoline (disturbance) |

Diferencijalne jednadžbe:

1.  $p = q_i * k_i$
2.  $e = r - p$
3.  $q_o = e * k_o$
4.  $q_i = k_f * q_o + k_d * d$

Slika 8. Dijagram kontrolne petlje s označenim fizičkim varijablama i linearnim konstantama

Signalni u dijagramu predstavljaju neuronske struje, koje se može definirati kao broj impulsa koji prolazi kroz skup živčanih vlakana u jedinici vremena. Budući da frekvencija impulsa ne može biti negativna, dijelovi kontrolne petlje su u organizmu implementirani posebno za negativne, posebno za pozitivne vrijednosti izlaznog signala. Primjerice, u slučaju mišića, imamo fleksore i ekstenzore koji se aktiviraju ovisno o predznaku izlaznog signala kako bi percipiranu kutnu poziciju izjednačili s referentnom kutnom pozicijom.

Matematički, kontrolna petlja na Slici 8 može se opisati s četiri diferencijalne jednadžbe koje predstavljaju trenutno stanje sustava. U simulacijama stvarnih sustava, kao što su neuronske kontrolne petlje, potrebno je voditi računa i o komponenti vremena jer signali putuju određeno vrijeme kroz živčana vlakna, a receptori i efektori reagiraju s određenim vremenom latencije.

Vrijeme latencije senzora i efektora, duljina živčanih vlakana koja prenose signale od ulazne funkcije do izlazne funkcije, te činjenica da su neke petlje u ljudskom živčanom sustavu vrlo dugačke, stvara značajan vremenski odmak između ulaza i izlaza. Prema matematičkoj analizi kontrolnih petlji, ako se ovaj odmak ne kompenzira, kontrolna petlja će proizvesti nestabilno i oscilatorno ponašanje (Powers, 1973; Kawato 1987; Wolpert,

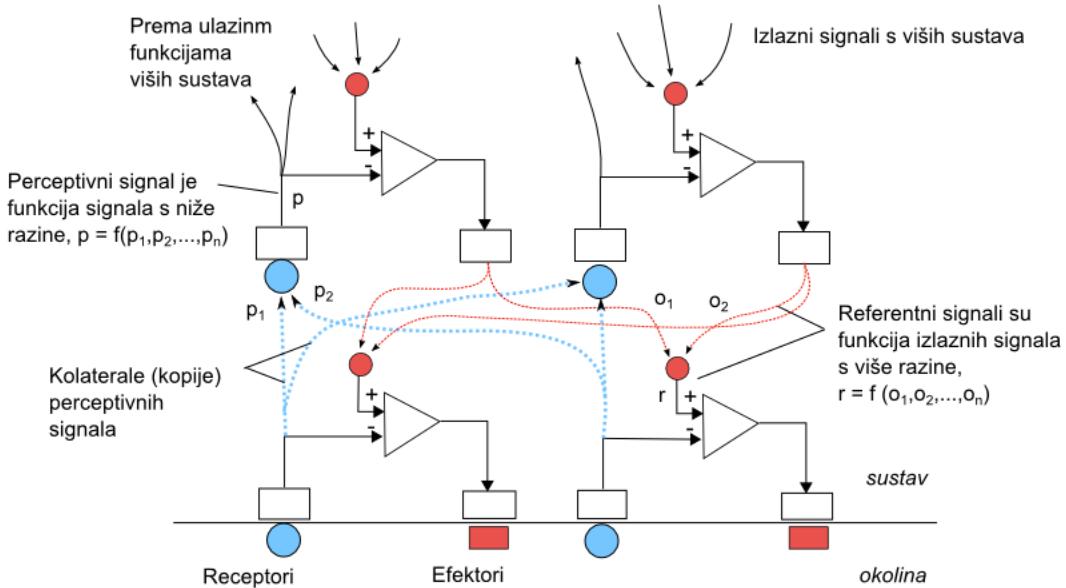
1999). Budući da su stvarne neuronske petlje stabilne, teoretičari predlažu da su u njima implementirane različite metode kompenzacije odmaka. Primjerice, Kawato (1987, 1999) i Wolpert i Ghahramani (2000) predlažu internalne modele koji se koriste za predikciju senzornog ulaza koji će doći sa zakašnjenjem. Powers predlaže kompenzaciju koju naziva usporena proporcionalna kontrola (eng. *slowed proportional control*), koja je, za razliku od metoda internalnih modela, kompjutacijski vrlo nezahtjevna. Računalne simulacije petlji s vremenom latencije jednakim onima u ljudi, pokazuju da su petlje s ovim oblikom kompenzacije stabilne. Također, kao što je spomenuto, eksperimentalno je utvrđeno da simulacije petlji ovog tipa s visokom uspješnošću reproduciraju ponašanje ispitanika u senzomotornim zadatcima; korelacije ponašanja ispitanika i simulacija su na razini  $r > 0.95$  (Powers 1978, 1989, 1992; Marken 1986, 2001, 2002, 2005; Bourbon 1995).

#### 1.6.2. Hijerarhijska organizacija

Postoji velik broj hipoteza o hijerarhijskoj organizaciji neuronskih sustava. Najraniju hipotezu o hijerarhijskoj organizaciji u motoričkoj kontroli vjerojatno je iznio John Hughlins Jackson (1899, prema Latash, 2012), a pod njegovim utjecajem svoju verziju iznio je Nikolai Bernstein (1937, 1967; prema Latash, 2012). U kognitivnoj psihologiji poznata je hipoteza Minskoga (1988) o hijerarhiji u percepciji, a utjecajna je i Hayekova (1952) hipoteza. Priroda neuronske hijerarhije jedno je od centralnih pitanja i u suvremenoj neuroznanosti (Hawkins i Blakeslee, 2007; Kaiser, Hilgetag, i Kötter 2010).

Hijerarhija koju predlaže PCT (Powers, Clark i McFarland, 1960; Powers, 1973) definirana je u kontekstu funkcioniranja kontrolnih petlji i signala koji se prenose živčanim vlaknima između petlji na različitim razinama (slika 9). Petlje prve razine izravno su povezane s receptorima i efektorima organizma. Kolaterale sa receptora prenose kopije perceptivnih signala s prve razine prema ulaznim funkcijama druge razine, gdje se formiraju novi perceptivni signali. Ovi perceptivni signali predstavljaju novu kontroliranu varijablu koja je apstrakcija ili invarijanta signala o kojima ovisi. Primjerice, udaljenost od ramena do prsta može biti funkcija kutnih pozicija zglobova i može ostati nepromijenjena iako se kutne pozicije zglobova mijenjaju. Petlje na drugoj razini nisu povezane izravno s efektorima, nego kontroliraju svoje perceptivne varijable koristeći petlje prve razine kao svojevrsne efektore, postavljajući referentne signale.

Ova hijerarhijska organizacija nastavlja se dalje po istom principu – ulazni signali se formiraju kao funkcije perceptivnih signala s niže razine, referentni signali dolaze sa razine iznad, a kombinacije izlaznih signala tvore referentne signale za niže razine.



Slika 9. Dvije razine hijerarhijskog sustava kontrolnih petlji

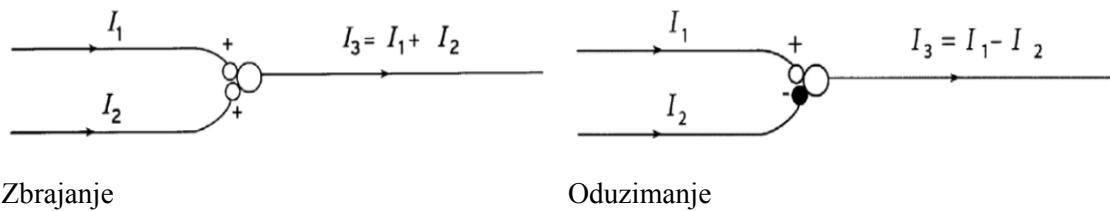
Kontrolirane percepcije postaju sve apstraktnije što su više u hijerarhiji, a petlje na zadnjoj rizini nemaju promjenjive, nego konstantne referentne signale. Powers (1973) predlaže 11 razina za ljudsku neuronsku hijerarhiju: intenziteti, osjeti, konfiguracije, vremenski prijelazi, događaji, odnosi, kategorije, sekvene, programi, principi i sistem-koncepti, no ističe kako su to hipotetski konstrukti koje tek treba eksperimentalno provjeriti, osobito za sustave na višim razinama.

### 1.6.3. Biološka osnova kontrolnih procesa

Prema Powers (1973) mozak je sličniji analognom računalu nego digitalnom. Prvi model neurona bio je digitalan, a razvili su ga Pitts i McColluch (1943). Model koji su nazvali formalnim neuronom funkcioniра kao logički sklop s dva moguća stanja – aktivno i neaktivno. Pojedini neuron prima nekoliko ulaza koje su poslali drugi neuroni. Ulazi se sumiraju i stanje neurona je određeno vrijednošću sume ulaza u odnosu na neki prag (eng. *threshold*): ako je suma veća od praga, neuron se aktivira, a ako je manja, neuron ostaje neaktivovan. Pokazano je da se sve logičke funkcije mogu implementirati pomoću formalnog neurona te da je moguće stvaranje univerzalnog računala pomoću sklopova sastavljenih od

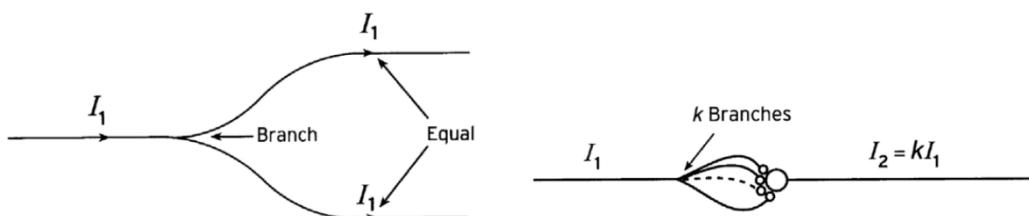
formalnih neurona iz čega se razvila hipoteza da mozak radi kao digitalno računalo. Hipotezu da mozak radi kao digitalno računalo, te da je neuronski kod određen aktivno-neaktivno stanjem pojedinih neurona kritizirali su brojni istraživači i razvijali alternativne modele neurona i neuronskih mreža. Suvremene teorije uključuju digitalni i analogni model, te različite načine kodiranja informacija (Dayan i Abbot, 2001)

Model neurona korišten u PCT-u nije digitalan, nego analogan - prepostavlja kontinuiranost u mijenjanju varijabli. Neuronski kod određen je neuronskim strujama (ili signalima) koje su definirane kao broj impulsa koji prolazi kroz određeni snop paralelnih neuronskih vlakana u jedinici vremena. Neuronske struje generiraju receptori kao reakciju na podražaj iz okoline ili neuroni podraženi drugim neuronskim strujama. Frekvencija generiranih impulsa na receptorima retine, primjerice, korelira s intenzitetom podražaja na receptoru, a frekvencija impulsa na receptorima istegnutosti tetine s logaritmom istegnutosti. Sva kompjutacija u neuronskim mrežama odvija se pomoću frekvencija impulsa na nekom neuronu, odnosno živčanom vlaknu.

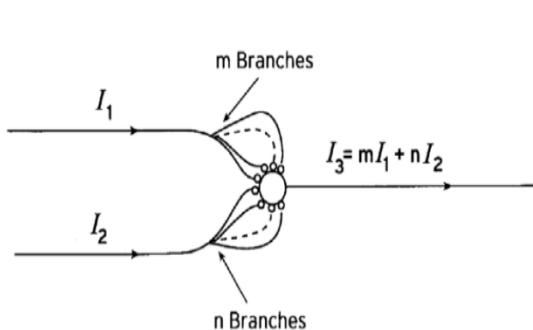


Slika 10. Jednostavne računske operacije na neuronskim strujama

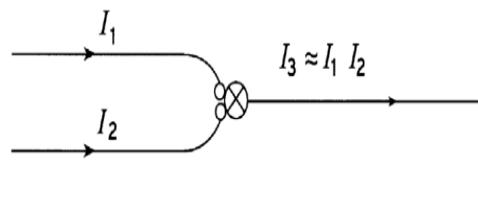
Ako neuronske struje predstavimo slovom  $I$ , kao u elektrotehnici, računske operacije zbrajanja i oduzimanja mogu biti predstavljena kao na Slici 10. Bijeli krugovi predstavljaju ekscitatorne sinapse, a crni inhibitorne. Za razliku od električne struje, frekvencija ne može biti negativna, rezultat oduzimanja nikada neće biti negativan, nego može biti najmanje nula. Druga razlika neuronskih i el. struja je smjer protoka – el. struje mogu se kretati u oba smjera po vodiču, a neuronske struje kreću se uvijek od dendrita prema aksonu.



Treća razlika je što izvor energije za neuronsku struju nije isti kao za električnu energiju i ne koristi se zakon održanja količine energije. Ako se živčano vlakno podijeli, neuronska struja će biti jednaka u obje grane (slika 11). Kolaterale s istog aksona mogu završavati na istom neuronu, pa su tako mogući amplifikacija signala (slika 12) i ponderirano zbrajanje (slika 13).



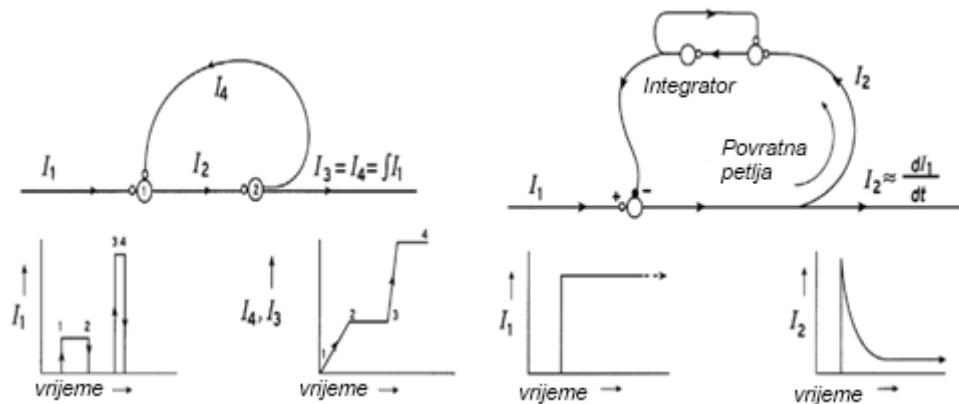
Slika 13. Ponderirano zbrajanje



Slika 14. Množenje

Ako je za generiranje jednog impulsa potrebno istovremeno pristizanje dva (ili više) impulsa, tada će izlazna frekvencija biti približno jednaka produktu ulaznih frekvencija; u slučaju da su neke sinapse inhibitorne, rezultat će biti frekvencija ekscitatorne struje podijeljena frekvencijom inhibitorne (slika 14). U analognoj neuronskoj mreži u kojoj frekvencija impulsa prenosi informacije moguće su, dakle, sve algebarske funkcije.

Za funkcije koje koriste vrijeme kao varijablu potrebni su integratori i derivatori. Neuronski sklopovi koje Powers predlaže kao integratore su tzv. reverberativni krugovi. Deriviranje može biti postignuto na više načina. Jedan je habituacija, a drugi predloženi mehanizam može se vidjeti na slici 15.



Slika 15. Integriranje po vremenu i deriviranje po vremenu

## 1.7. Little Man model integracije vida i motoričke kontrole

U ovom radu konstruiran je i analiziran robotski sustav koji implementira hijerarhijski model kontrole koji integrira vidne, proprioceptivne i haptičke informacije, te koordinira pokret. Osnova sustava je teorija kontrole percepције, konkretno simulacije ArmOne (Little Man), ArmTrackTarget i Arm Coordination.

Little Man je simulacija hijerarhijskih kontrolnih sustava odgovornih za koordinaciju pokreta ruke i glave, te integraciju vidnih i proprioceptivnih senzornih informacija (slika 16). Simulirani čovjek pogledom i prstom prati trokut u trodimenzionalnom prostoru koristeći retinalni disparitet za procjenu udaljenosti, a simulacija uključuje efekte gravitacijske sile na ruku.

Postoji još nekoliko iteracija PCT modela motoričke i vidne kontrole. ArmTwo (Powers, 1998) proširen je realističnim modelom mišića i nezavisnom kontrolom duljine mišića i mišićnog tonusa. U modelu ArmCoordination (Powers, 2008) ruka ima 14 stupnjeva slobode, za razliku od 3 stupnja u ArmOne, a u ArmReorganization modelu (Powers, 2008) prikazana je teorija reorganizacije koja objašnjava jedan aspekt motoričkog učenja.



Slika 16. Little Man iz simulacije ArmOne, Powers (1989), i ArmTrackTarget, Model ruke s 14 stupnjeva slobode Powers (2008).

Računalne simulacije često su prvi korak u konstrukciji funkcionalnih modela živčanog sustava, no mogu postojati velike razlike u ponašanju simuliranog sustava i njegove fizičke implementacije jer, kako upozorava Brooks (1992: str 2) „*Postoji velika opasnost (u stvari gotovo je sigurno) da programi koji dobro rade na simuliranim robotima potpuno zakažu na fizičkim sustavima zbog razlika između stvarnih i simuliranih senzora i efektora – vrlo je teško simulirati stvarnu dinamiku fizičkog svijeta*“ i kasnije

(Brooks, 1992: str 4) „*senzori jednostavno ne daju precizna očitanja. U najboljem slučaju daju aproksimaciju onoga što navodno mijere uz puno šuma, a često daju nešto potpuno drugačije*“

U odnosu na simulacije ArmOne i ArmCoordination, robotski sustav je pojednostavljen manjim brojem zglobova ruke, te je implementirana samo percepcija dvije dimenzije vidnih odnosa. Sustav je proširen dodatkom haptičkih senzora, odnosno senzora pritiska ruke na podlogu. Uloga haptičkih senzora je dvostruka – poboljšavanje preciznosti vertikalnog pozicioniranja ruke u odnosu na podlogu, te omogućavanje rada sustava unatoč variranju nagiba podloge.

## **2. Cilj, problemi i hipoteze**

### **2.1. Cilj:**

Implementirati hijerarhijske petlje za kontrolu motorike i integraciju proprioceptivnih, vidnih i haptičkih informacija bazirane na teoriji kontrole percepcije u robotskom sustavu, te usporediti ponašanje robotskog sustava s ponašanjem skupine ispitanika ( $N=7$ ,  $M_{dob} = 27.6$ )

### **2.2. Problem i hipoteze:**

1. Utvrditi frekvencijske karakteristike robotskog sustava i ispitati uspješnost u integraciji vidnih informacija u različitim zadatcima praćenja mete.

H1: Na temelju simulacija prijašnjih istraživanja, može se prepostaviti da će robotski sustav uspješno izvršavati zadatak praćenja mete za određeni raspon frekvencija kretanja mete.

2. Ispitati uspješnost u integraciji haptičkih informacija u različitim zadatcima praćenja mete

H2: Kada je riječ o uspješnosti haptičkog sustava, očekuje se da će se krivulje uspješnosti preklapati u situaciji kada robotski sustav zadatak izvršava na horizontalnoj podlozi i situaciji kada se zadatak izvršava na podlozi pod kutom od 30 stupnjeva.

3. Ispitati razlike u uspješnosti u izvršavanju zadataka praćenja mete između robotskog sustava i ispitanika u uvjetima različite brzine kretanja mete.

H3: Može se prepostaviti da će robotski sustav izvršavati zadatak praćenja mete s približno jednakom uspješnosti kao i ispitanici, i to pri sporijem kretanju mete. Zbog mehaničkih ograničenja robotskog sustava, pri bržem kretanju mete očekuju se razlike između robotskog sustava i ispitanika, u smjeru veće uspješnosti ispitanika.

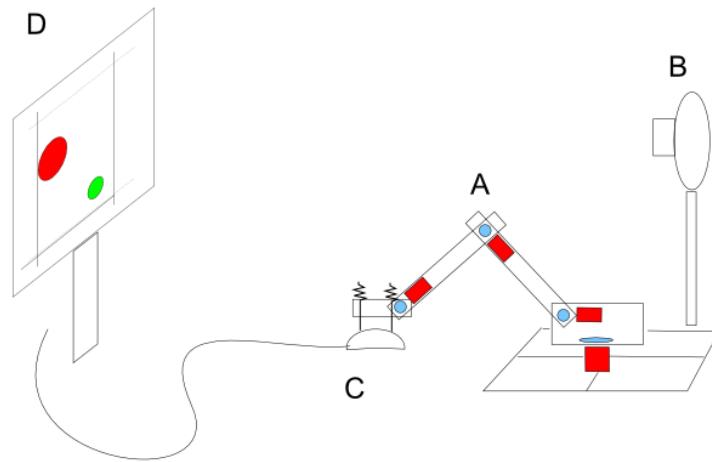
### 3. Metoda

#### 3.1. Konstrukcija robotskog sustava

Robotski sustav (slika 17; Prilog 1) sastoji se od mehaničke ruke, video kamere i softvera na računalu. Ruka je napravljene od PVC plastike (tzv. Forex plastika, Sintra, foam board), s četiri zgloba, odnosno stupnja slobode. Elementi su izrezani skalpelom iz ploče debljine 3mm i 5mm. Svaki zglob pokreću jedan ili više elektromotora, tip N20, s reduksijskim zupčanicima. Kao senzor kuta na zglobu korišteni su potenciometri postavljeni na osovinu zgloba otpora 5kOhma s linearnom skalom.

Na dlanu ruke nalaze se tri senzora pritiska napravljeni od kliznih potenciometara, otpora 10kOhm, linearni tip. Pritisak dlana na podlogu pomiče potenciometar koji je vezan lateks trakom na nultoj poziciji. Budući da je elastična sila trake proporcionalna istegnutosti, očitanje senzora proporcionalno je pritisku dlana na podlogu.

Podatke iz senzora prikuplja elektronska ploča PJRC Teensy 3.1, na kojoj su implementirane dvije razine kontrolnih petlji za pokret ruke i jedna petlja s treće razine za kontrolu pritiska. Za pogon motora korišten je IC *TB6612FNG motor driver*, a sustav je radio na 12V. Softver je napisan u programskom jeziku C koristeći Teensyduino okruženje.

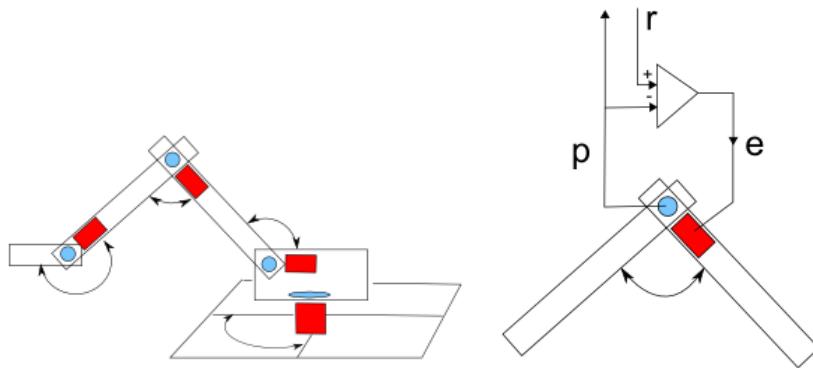


Slika 17. Robotski sustav izvršava zadatak praćenja mete. Ruka (A), kamera (B) i računalo (nije na slici) koje obrađuje vidne informacije čine sustav nezavisnim od sustava za prikaz podražaja na monitoru (D) i snimanje pozicija mete i kursora kojim upravlja računalni miš (C).

Za vidni sustav korištena je standardna USB web kamera. Rezolucija je smanjena na 320x240 piksela kako bi se ubrzalo procesiranje i postiglo 30 slika u sekundi. Softver se izvršavao na računalu, napisan je u programskom jeziku C++, korišten je Qt paket, te OpenCV skup funkcija za računalni vid (slika 23). Meta i cursor razlikovani su po boji pomoću dva HSV filtera. Informacije iz vidnog sustava slane su na Teensy upravljačku ploču putem USB sučelja 30 puta u sekundi.

### 3.1.1. Hiperarhija kontrolnih petlji – prva razina

Petlje na prvoj razini kontroliraju kutnu poziciju (slika 18) slični su standardnim servo-motorima s proporcionalnom kontrolom. Ulazni signal ( $p$ ) predstavlja trenutnu kutnu poziciju, referentni signal ( $r$ ) traženu kutnu poziciju, a njihova razlika ( $e$ ) pretvara se u voltažu koja pokreće motor brzinom proporcionalnom voltaži i tako približava trenutnu kutnu poziciju traženoj poziciji. Signali i operacije koje izvodi komparator simulirani su na ploči Teensy 3.1 uz period koraka od 2 ms (500 Hz).

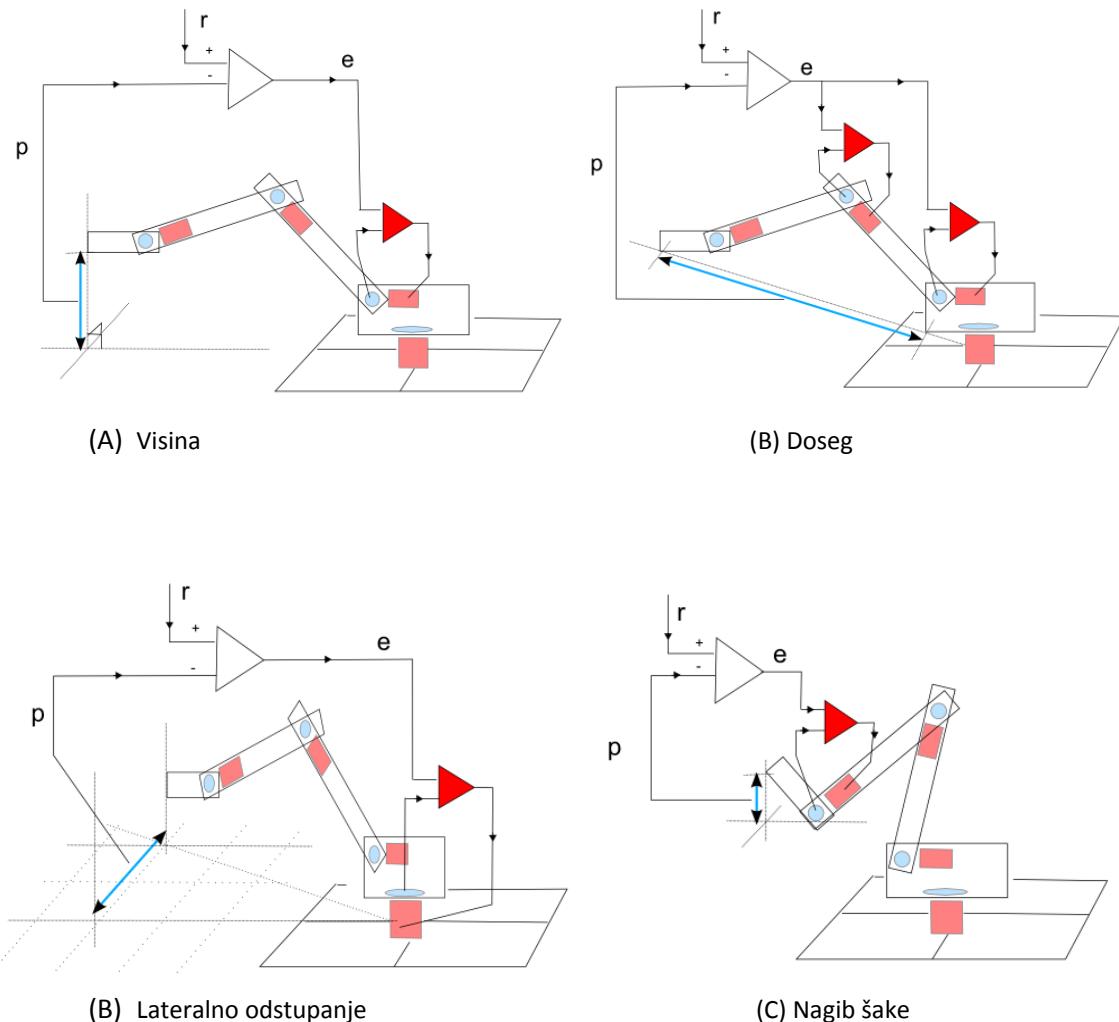


Slika 18. Robotska ruka ima 4 stupnja slobode (tj. 4 zgloba), a svaki zglob s motorom (crveni pravokutnik), potenciometrom (plavi krug) i komparatorom (bijeli trokut) čini petlju prve razine za kontrolnu kutne pozicije.

### 3.1.2. Druga razina

Petlje druge razine kontroliraju visinu, lateralno odstupanje, doseg i nagib šake (slika 19). Ulazni signal ( $p$ ) računa se koristeći trigonometrijske formule u koje se uvrštavaju trenutne vrijednosti kuteva s pojedinog zgloba s prve razine. Referentni signal

(r) predstavlja traženu vrijednost ulaznog signala, a izlazni signal (e) postaje referentna vrijednost za jednu ili više petlji na prvoj razini. Drugim riječima, ulazni signali na drugoj razini kontroliraju se variranjem referentnih razina petlji s prve razine, kao što se kutna pozicija na prvoj razini kontrolira variranjem brzine motora.



*Slika 19.* Četiri kontrolne petlje druge razine. Plave linije sa strelicama su ulazne veličine (p), bijeli trokut je komparator u kojem se uspoređuju ulazne i referentne veličine (r), a njihova razlika (e) proslijedena je komparatore s prve razine (crveni trokut).

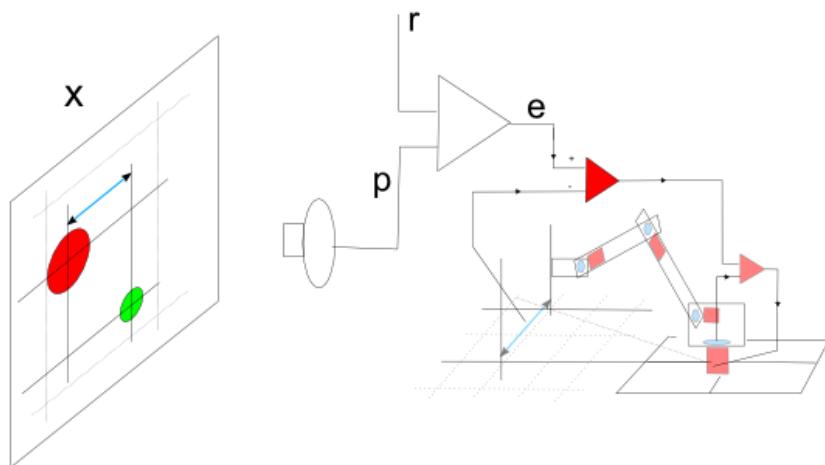
Visina predstavlja vertikalnu udaljenost vrha 'prsta' od podloge, a kontrolira se podešavanjem kuta u 'ramenu'. Doseg je udaljenost vrha prsta od baze robota, kontrolira se istovremenim pokretanjem ramena i lakta. Lateralno odstupanje je horizontalna udaljenost vrha prsta od pravca koji prolazi kroz bazu robota i okomit je na nju, kontrolira se

podešavanjem kuta rotacije baze. Nagib šake je vertikalna udaljenost vrha prsta od ravnine zgloba šake i kontrolira se pokretanjem šake.

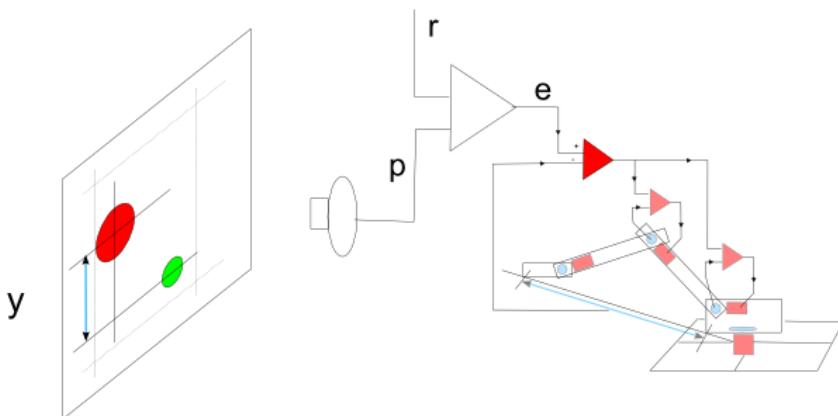
Na ovoj razini javlja se interakcija različitih kontrolnih sustava. Primjerice, ako se promijeni tražena visina ( $r$ ), kontrolni sustav za visinu pokrenut će motor na ramenu. Promjena kuta na ramenu rezultirat će promjenom nagiba šake prema horizontalnoj ravnini, pa će kontrolni sustav za nagib šake pokrenuti motor šake.

### 3.1.3. Treća razina

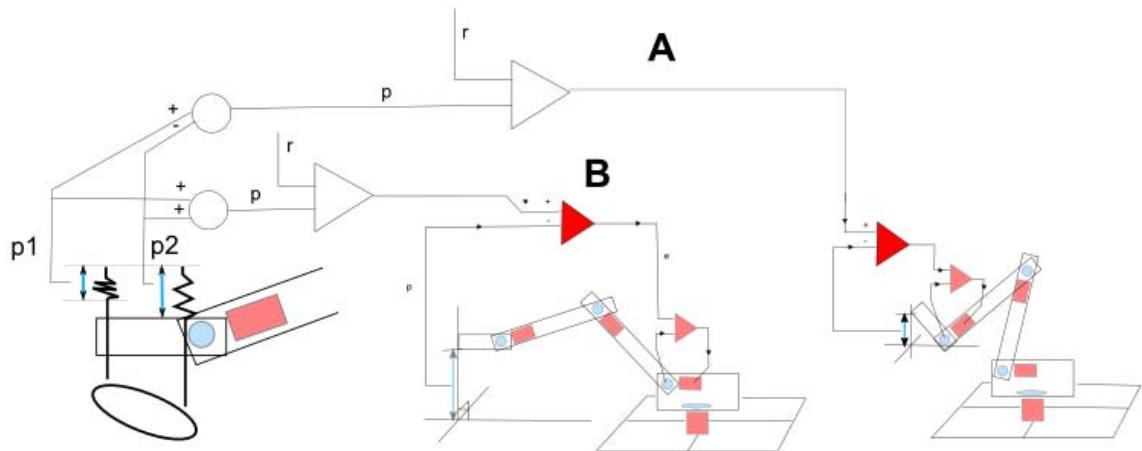
Petlje treće razine kontroliraju vidne i proprioceptive signale. Pomoću kamere i obrade signala koristeći OpenCV paket konstruiraju se signali koje predstavljaju vertikalnu i horizontalnu relativnu udaljenost kursora od mete (Slike 20 i 21), odnosno x-sustav i y-sustav. Takoder na trećoj razini nalaze se petlje za kontrolu pritiska na podlogu (slika 22).



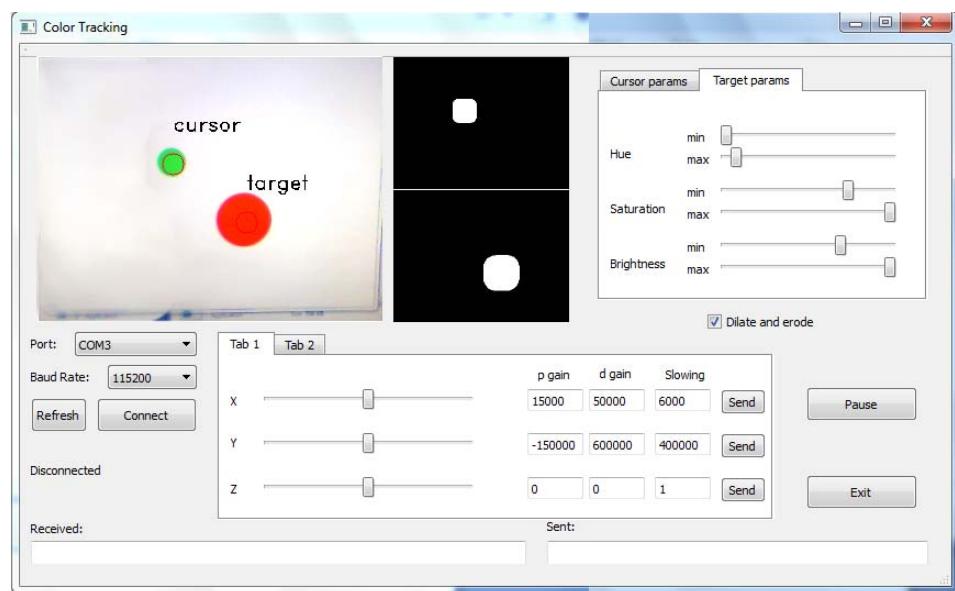
*Slika 20.* Kontrola horizontalne udaljenosti kursora od mete (x sustav), postiže se variranjem lateralnog odstupanja.



*Slika 21.* Kontrola vertikalne udaljenosti kursora od mete (y sustav), postiže se variranjem dosega.



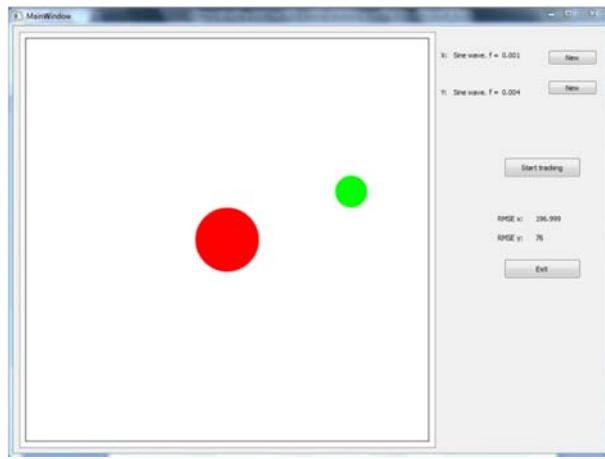
*Slika 22.* Dvije petlje treće razine za kontrolu pritiska na podlogu. Petlja A kontrolira razliku između pritiska  $p_1$  i  $p_2$  varirajući nagib šake. Petlja B kontrolira sumu pritiska  $p_1$  i  $p_2$  varirajući visinu. Kontrola pritiska omogućava sustavu djelomičnu neovisnost o visini i nagibu podloge u odnosu na visinu ruke u izvršavanju zadatka praćenja mete.



*Slika 23.* Upravljačka ploča robotskog sustava. Vidljiva je slika iz kamere koja je uperena u ekran drugog računala na kojemu se izvršava zadatak praćenja mete. Vidni sustav identificirao je zeleni krug kao kurzor, a crveni kao metu. Na upravljačkoj ploči podešavaju se referentni signali za petlje treće razine

### 3.2. Instrumenti:

Softver za zadavanje podražaja i snimanje putanje mete i kursora pisan je u programskom jeziku C++ koristeći Qt paket (slika 24). Sadrži generator sinusoidnih i slučajnih putanja mete. Sva mjerjenja snimaju se 60 puta u sekundi.



Slika 24. Softver za zadavanje podražaja i snimanje putanje mete i kursora

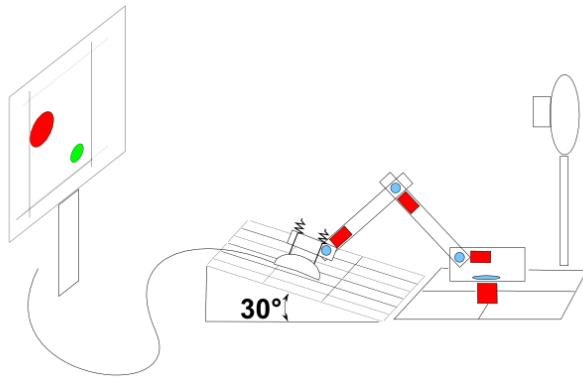
### 3.3. Postupak

#### 3.3.1. Utvrđivanje frekvencijskih karakteristika robotskog sustava

Frekvencijske karakteristike robotskog sustava utvrđene su usporedbom ulaznih sinusoidni signala s izlaznim signalima. Ulazni signal predstavlja putanja kretanja mete, a izlazni signal putanja kretanja kursora. Sustav je prošao kroz 6 zadataka u trajanju od jedne minute. Zadatci su se razlikovali u frekvenciji sinusoidne putanje kretanja mete koja je iznosila: 1/64Hz, 1/32Hz, 1/16Hz, 1/8Hz, 1/4Hz i 1/2Hz (Prilog 2). Amplituda je iznosila 250 piksela (ukupni raspon 500 piksela) za x i za y dimenziju. Posebno su analizirani x-sustav i y-sustav.

#### 3.3.2. Ispitivanje uspješnosti integracije haptičkih informacija robotskog sustava

Robotski sustav prošao je kroz dvije različite situacije u kojima je izvršio po 10 zadataka praćenja mete. U prvoj situaciji podloga po kojoj se kretao miš bila je horizontalna, dok je u drugoj nagib podloge miša postavljen je na 30° (slika 25).



Slika 25. Zadatak praćenja mete u situaciji s nagnutom podlogom

3.3.3. Ispitivanje razlika u uspješnosti u izvršavanju zadataka praćenja mete između robotskog sustava i ispitanika.

Ispitanici:  $N = 7$ , dob 24-33 godine,  $M = 27.16$ ,  $sd = 2.98$

Ispitanici su uvježbani u zadatku praćenja mete tako da su prošli nekoliko zadataka prije samoga mjerena. Nakon toga, ispitanici i robotski sustav prošli su kroz 10 zadataka praćenja mete. Putanje mete dobivene su algoritmom za sumiranje sinusoidnih valova s fazama generiranim po slučaju. Težina zadatka određena je frekvencijskim rasponom sumiranih valova, odnosno teži zadatci su sadržavali više frekvencije.

## 4. Rezultati

### 4.1. Frekvencijske karakteristike sustava

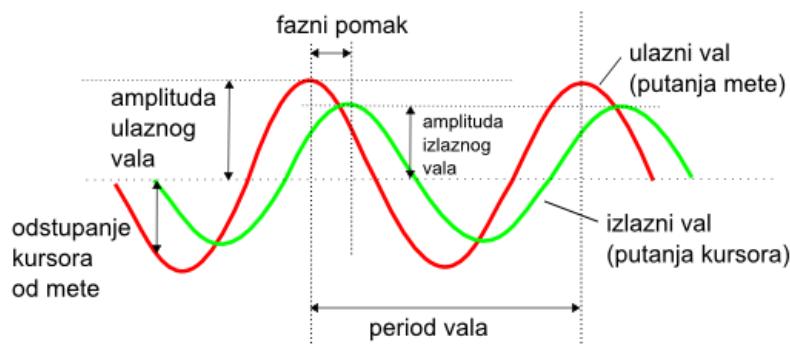
Graf frekvencijskog odgovora, poznat i kao Bodeov dijagram (Bode-plot), konstruiran je po rezultatima iz 6 mjerena u kojima je ulazni signal bio putanja mete, a izlazni signal putanja kurzora.

Meta se kretala po sinusoidnoj putanji amplitude 250 piksela i perioda naznačenih na apscisi amplitudnog i faznog grafa. Uobičajeno je na apscisu Bodeova dijagraama označiti frekvencije ( $f$ ) u Hz, no radi jasnoće označen je period vala koji se računa kao  $1/f$  i mjeri u sekundama.

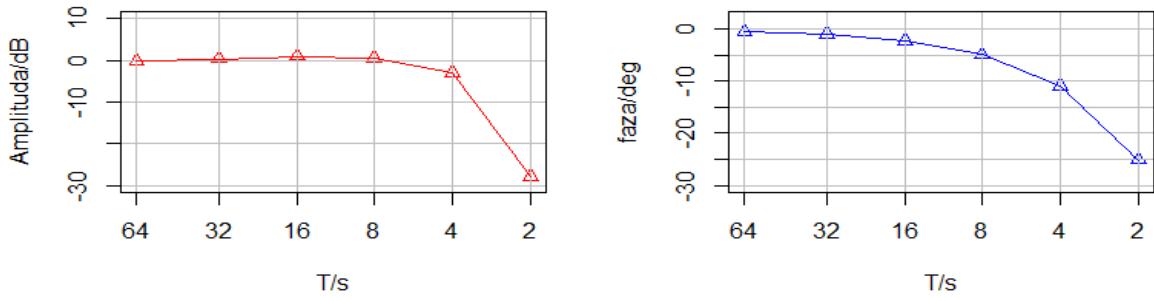
Omjer amplituda izražen je u decibelima i računa se po formuli  $\text{dB} = 20 \cdot \log(B/A)$  gdje je A amplituda putanje mete, a B amplituda putanje kurzora (slika 26). Vrijednost 0 dB označava jednaku amplitudu putanje kurzora i mete, a negativne vrijednosti znače da je amplituda putanje kurzora manja od amplitude putanje mete. Lomna frekvencija mjeri se na točki -3 dB.

Fazni pomak označava vremenski period između vrha ulaznog vala i vrha izlaznog vala i mjerjen je u stupnjevima, gdje  $0^\circ$  označava da izlazni val reproducira ulazni bez faznog pomaka, a negativne vrijednosti označavaju povećavanje faznog pomaka, odnosno kašnjenje izlaza za ulazom.

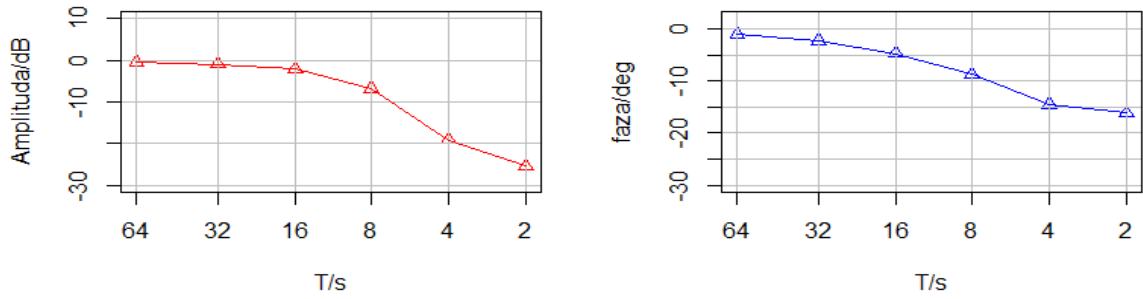
Bruto podatci (Prilog 1) obrađeni su u statističkom paketu R koristeći *curve-fitting* algoritme za procjenu amplitude i faze sinusoidnih valova.



Slika 26. Relevantne varijable ulaznog i izlaznog signala

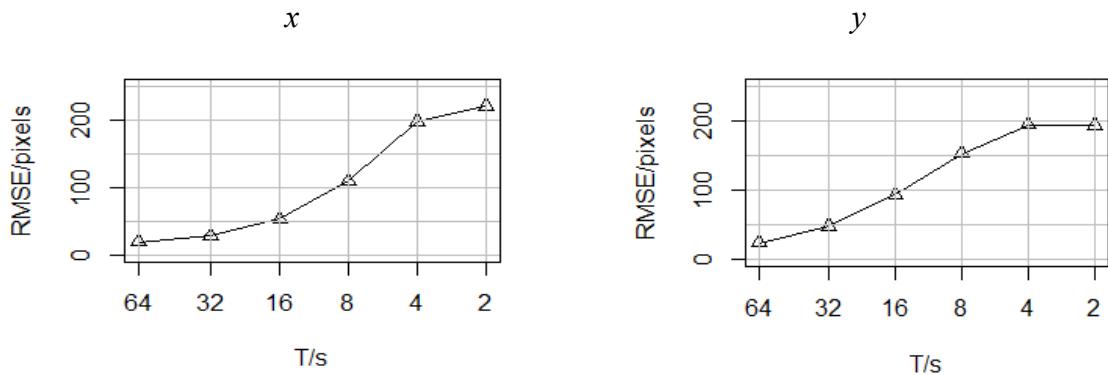


Graf 1. Frekvencijski odgovor x-sustava, omjer amplituda i fazni pomak u odnosu na frekvenciju ulaznog vala, frekvencija je izražena u duljini perioda  $T(s) = 1/f(\text{Hz})$ . Lomna frekvencija iznosi  $1/4 \text{ Hz}$ , pri kojoj se javlja fazni pomak od  $-10^\circ$



Graf 2. Frekvencijski odgovor y-sustava, omjer amplituda i fazni pomak u odnosu na frekvenciju ulaznog vala, frekvencija je izražena u duljini perioda  $T(s) = 1/f(\text{Hz})$ . Lomna frekvencija iznosi  $1/8 \text{ Hz}$ , pri kojoj se javlja fazni pomak od  $-10^\circ$

Rezultati prikazuju lomu frekvenciju  $1/4 \text{ Hz}$  za x-sustav i  $1/8 \text{ Hz}$  za y-sustav što znači da x-sustav može uspješno pratiti veći raspon ulaznih frekvencija od y-sustava.

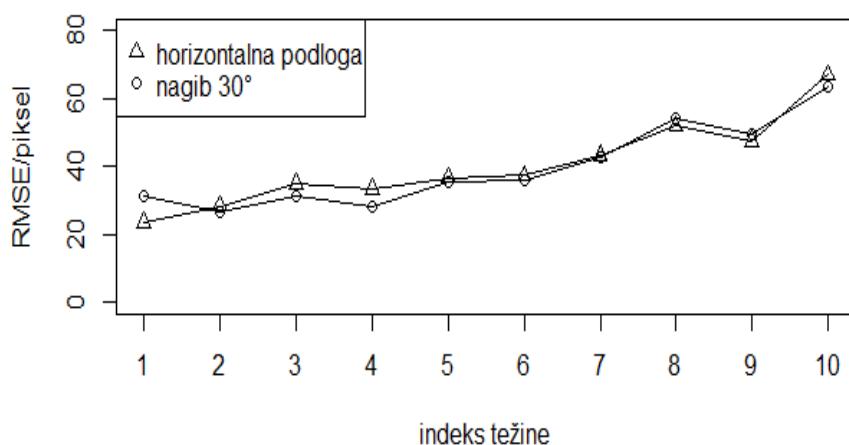


Graf 3. Korijen prosječnog kvadrata odstupanja (root-mean-square) u praćenju mete x-sustava i y-sustava dimenziji, u odnosu na frekvenciju ulaznog vala, frekvencija je izražena u duljini perioda  $T(s) = 1/f(\text{Hz})$ .

Rezultati pokazuju da se odstupanja veća od 10% putanje mete ( $>25$  piksela) javljaju pri frekvenciji  $1/16 \text{ Hz}$  za oba sustava.

## 4.2. Ispitivanje integracije haptičkih informacija

Integracija haptičkih informacija ispitana je u dvije situacije po 10 zadataka praćenja mete u kojima se meta kretala po putanji generiranoj sumiranjem sinusoidnih valova različite frekvencije s faznim pomakom odabranim po slučaju. Parametri robotskog sustava nisu mijenjani, variran je nagib podloge, u prvoj situaciji iznosio je  $0^\circ$ , a u drugoj  $30^\circ$ . Mjerena je samo učinkovitost y-sustava koji je pomicao ruku i miš od ramena prema naprijed, a cursor u smjeru gore-dolje.



Graf 4. Usporedba učinkovitosti robotskog sustava u praćenju mete u situaciji s horizontalnom podlogom i situaciji s nagibom podloge od  $30^\circ$ , u y dimenziji.

Rezultati pokazuju podjednaku uspješnost u situaciji s horizontalnom podlogom i situaciji s podlogom pod nagibom od  $30^\circ$ . Robotski sustav uspješno integrira haptičke informacije.

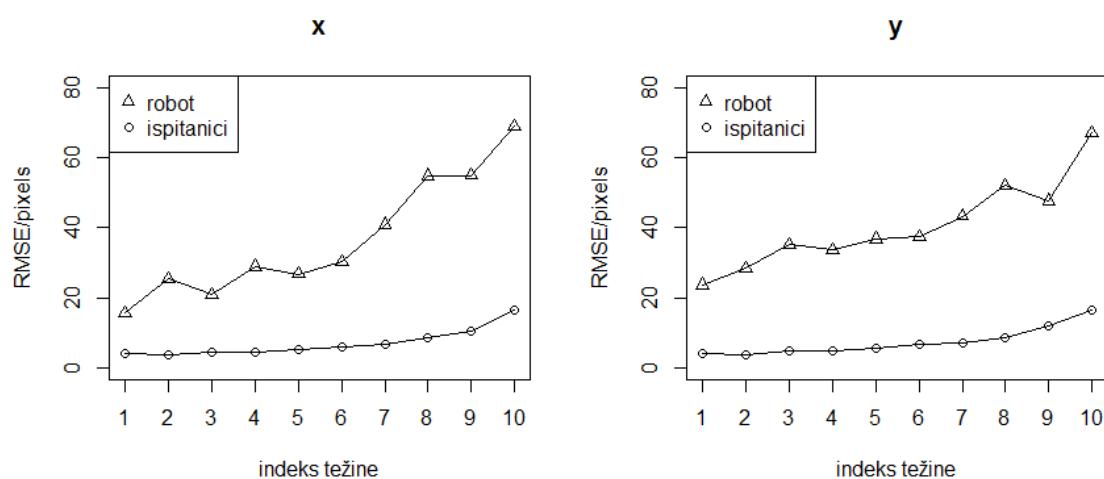
## 4.3. Usporedba učinkovitosti robotskog sustava i ispitanika

Robotski sustav i ispitanici ( $N=7$ ) prošli su 10 zadataka praćenja mete različite težine. Putanja mete generirana je sumiranjem sinusoidnih valova različite frekvencije s faznim pomakom odabranim po slučaju. Težina zadataka varirana je spektraklnim rasponom sumiranih sinusoidnih valova, tako da su teži zadaci sadržavali više frekvencije, odnosno meta se kretala brže. Nagib podloge iznosio je  $0^\circ$ .

Tablica 1. Razlike u učinkovitosti izvršavanja zadatka praćenja mete između prosječnih vrijednosti skupine ispitanika i vrijednosti robotskog sustava u X i Y dimenziji kroz 10 situacija različite težine

| Indeks težine | Dimenzija |            |       |         |       |           |            |       |         |       |
|---------------|-----------|------------|-------|---------|-------|-----------|------------|-------|---------|-------|
|               | X         |            |       |         |       | Y         |            |       |         |       |
|               | $M_{isp}$ | $SD_{isp}$ | robot | T       | d     | $M_{isp}$ | $SD_{isp}$ | robot | t       | D     |
| 1             | 4.09      | 1.33       | 15.73 | 23.08*  | 8.72  | 4.32      | 1.03       | 23.73 | 49.74*  | 18.80 |
| 2             | 3.88      | 0.81       | 25.47 | 70.11*  | 26.50 | 3.93      | 0.49       | 28.48 | 131.96* | 49.88 |
| 3             | 4.48      | 1.31       | 20.85 | 32.96*  | 12.46 | 4.73      | 0.99       | 35.14 | 81.56*  | 30.83 |
| 4             | 4.35      | 1.05       | 29.01 | 61.92*  | 23.40 | 4.90      | 1.26       | 33.61 | 60.42*  | 22.84 |
| 5             | 5.36      | 1.40       | 26.83 | 40.42*  | 15.28 | 5.53      | 1.25       | 36.78 | 66.36*  | 25.08 |
| 6             | 6.03      | 1.31       | 30.27 | 49.00*  | 18.52 | 6.68      | 1.44       | 37.36 | 56.31*  | 21.28 |
| 7             | 6.70      | 1.03       | 40.99 | 87.92*  | 33.23 | 7.30      | 2.00       | 43.31 | 47.56*  | 17.98 |
| 8             | 8.69      | 0.64       | 54.78 | 191.83* | 72.50 | 8.76      | 0.89       | 52.00 | 129.14* | 48.81 |
| 9             | 10.43     | 0.76       | 54.92 | 154.68* | 58.46 | 12.02     | 1.28       | 47.62 | 73.57*  | 27.81 |
| 10            | 16.46     | 1.55       | 68.95 | 89.51*  | 33.83 | 16.67     | 2.20       | 67.11 | 60.53*  | 22.88 |

\* $p < 0.01$



Graf 5. Korijen prosječnog kvadriranog odstupanje (root-mean-square) za robotski sustav i prosječna odstupanja skupine ispitanika u zadatku praćenja mete kroz 10 situacija različite težine.

U svih deset zadataka praćenja mete, u obje dimenzije, dobivena je statistički značajna razlika ( $p < 0.01$ ) u učinkovitosti između robotskog sustava i skupine ispitanika, robotski sustav bio je manje učinkovit.

## 5. Diskusija

Hijerarhija kontrolnih petlji implementirana u fizički sustav uspješno je integrirala vidne, proprioceptivne i haptičke informacije, koordinirala četiri stupnja slobode robotske ruke i cjelokupni sustav uspješno je autonomno izvršavao zadatku praćenja mete. Analiza frekvencijskih karakteristika sustava pokazuje lomnu frekvenciju  $1/4 \text{ Hz}$  (period  $T=4\text{s}$ ) za x-sustav (graf 1) i  $1/8 \text{ Hz}$  u za y-sustav (graf 2) no postoji značajan fazni pomak koji rezultira greškama većim od 10% raspona (graf 3) na frekvencijama višim od  $1/16 \text{ Hz}$  u oba sustava.

Ovaj rezultat potvrđuje prvu hipotezu i predviđanja računalnih simulacija (Powers, 1998, 2008), te pokazuje da se jednostavne kontrolne petlje raspoređene u hijerarhiju koju predlaže teorija kontrole percepcije mogu koristiti u interakciji s fizičkim elementima. Demonstrirana uspješnost sugerira da postoji potencijal objašnjavanja analognih neuronskih struktura u podlozi ljudskog senzomotornog sustava iz perspektive teorije kontrole percepcije, kao i potencijal korištenja predloženih kontrolnih struktura u stvaranju adaptivnih robotskih sustava koji bi izvršavali cilju usmjerene zadatke.

Razlika u frekvencijskim karakteristikama x i y sustava vjerojatno su posljedica korištenja motora različitih karakteristika u izlazima ova dva sustava. Naime, x-sustav koristi jedan stupanj slobode, lateralno odstupanje, koji koristi jedan motor u bazi ramena, dok y-sustav koristi petlju za udaljenost, koja pak koristi motore ramena, laka i šake. Motor u bazi ramena bio je nešto veći od ostalih, te budući da je imao veću redukciju putem zupčanika, bio je i precizniji. Budući da rad svake kontrolne petlje ovisi o nekoliko parametara, također je moguće da bi se učinkovitost sustava poboljšala kada bi se parametri podesili na druge vrijednosti.

Ispitivanje uspješnosti integracije haptičkih informacija usporedbom izvršavanja zadatka praćenja mete na horizontalnoj podlozi i polozi pod nagibom od  $30^\circ$  u 10 zadataka različite težine pokazuje da se krivulje uspješnosti poklapaju (graf 4), čime je potvrđena druga hipoteza.

U usporedbi s teorijama unutarnjih modela (Kawato, 2003; Wolpert i Gharhamani 2000), hijerarhijski sustav percepcijskih kontrolnih petlji mnogo je jednostavniji i može se tvrditi da je biološki plauzibilniji, budući je većina kompjutacijskih procesa izvediva u neuronskim sustavima.

## 5.1. Biološka plauzibilnost sustava

Iako fizički elementi sustava - potenciometri i elektromotori - nisu vjerna reprezentacija bioloških receptora i mišića, može se tvrditi da je struktura hijerarhijske kontrole percepcije biološki plauzibilna. Kompjutacijski procesi koje izvode komparatori petlje svode se na ponderirano sumiranje ekscitacijskih i inhibicijskih signala. Mehanizam kompenzacije kašnjenja je jednostavna metoda usporene proporcionalne kontrole, a postojanje šuma u perceptivnim signalima kompenzira se smanjenom osjetljivošću (eng. *gain*) petlji na nižim razinama i većom osjetljivošću petlji na višim razinama.

Petlje na prvoj razini sustava koje kontroliraju kutnu poziciju zglobova predstavljaju pojednostavljene spinalne petlje koje su uključene u kontrolu kuta na zglobovima i kontrolu mišićnog tonusa. U analiziranom robotskom sustavu ove dvije petlje pojednostavljene su u jednu zbog korištenja elektromotora umjesto mišića i tetiva. Budući da se bez elastičnih elemenata ne može reproducirati dinamika mišićnog tonusa, reproducirana je samo kontrola kutne pozicije.

Druga razina petlji rješava problem stupnjeva slobode koordinirajući petlje s niže razine i pruža model neuronske organizacije mišićnih sinergija. Koncept mišićnih sinergija koje su definirane općenito kao procesi koaktivacije grupe mišića u jednom pokretu poznat je od kraja 19. stoljeća (Babinski, 1899, i Jackson, 1900, prema Latash, 2012). Eksperimentalno je potvrđeno da stimulacija određenih spinalnih neurona u žaba (Hart i Giszter, 2010), kornjača (Stein, 2004) ili mačaka (Ting i McPearson, 2005) rezultira koaktivacijom mišića jedne grupe, što se smatra potvrdom postojanja sinergija u neuronskim sustavima tih životinja, no nije utvrđena priroda neuronskih mehanizama koji stoje u podlozi ovih ponašanja (Hart i Giszter, 2010). Predložene kontrolne petlje u robotskom sustavu koriste grupe mišića kako bi kontrolirale prostorne odnose između elemenata sustava. Prostorni odnosi, kao što su udaljenost vrha prsta od podloge ili ramena su funkcije kutnih pozicija zglobova i duljina dijelova ruke, računaju se pomoću jednostavnih trigonometrijskih funkcija koje živčani sustav vjerojatno ne izvršava na isti način, no budući da su ovi sustavi relativno neprecizni (ukupna preciznost se povećava u interakciji s petljama više razine) za uspješno funkcioniranje bile bi dovoljne i biološki plauzibilnije približne funkcije (Powers, 2008). Također je moguće integriranje informacija iz drugih receptora proprioceptivnog i haptičkog sustava koji bi doprinijeli u procjeni trenutne kutne pozicije udova.

Kontrolne petlje na trećoj razini kontroliraju vidne percepcije udaljenosti kursora od mete u x i y dimenziji varirajući referente signale petlji s druge razine. Vidni sustav robota nije zamišljen kao detaljna reprezentacija ljudskog vidnog sustava, služi samo za generiranje signala koji predstavljaju udaljenosti mete i kursora. Prepostavljeno je da stvarne neuronske mreže mogu producirati signal koji predstavlja udaljenost dva objekta u prostoru. Zbog jednostavnosti, korištene su samo dvije petlje, jedna za x, jedna za y dimenziju. Analogni sustavi u stvarnim neuronskim mrežama vjerojatno se sastoje od više petlji i implementiraju populacijsko kodiranje (Georgopoulos i sur, 1986) za predstavljanje smjera kretanja, no simulacije pokazuju da je pojednostavljivanje opravdano (Powers, 1979) jer su petlje sposobne za identično ponašanje.

Budući da se računalni miš kojim je upravljaо sustav kretao po horizontalnoj podlozi, a monitor u kojega je bila uperena kamera je bio postavljen vertikalno, petlja koja je kontrolirala položaj kursora u x dimenziji varirala je lateralno odstupanje ruke, a petlja koja je kontrolirala položaj kursora u y dimenziji varirala je udaljenost šake od baze robota. Nije bilo nužno savršeno precizno podesiti nagib miša u odnosu na robotsku ruku i kretanje kursora - primjerice lateralni pokret je mogao djelomično utjecati na pokret kursora u y dimenziji, no y-sustav je kompenzirao ovaj pomak.

Također na trećoj razini nalaze se dvije petlje za kontrolu pritiska ruke na podlogu. Ove petlje variraju visinu ruke i nagib šake kako bi održale pritisak konstantnim, što omogućava približno jednak uspješno izvršavanje zadatka uz različite nagibe podlove (graf 5) bez mijenjanja parametara modela. Koordinacijske petlje druge razine nisu osobito precizne (radi se o low gain sustavima) i kontrola pritiska primarno služi za poboljšavanje preciznosti položaja ruke i njeno održavanje na maloj udaljenosti iznad računalnog miša. Ova petlja omogućava korištenje nepreciznih senzora kutne pozicije i kompenzira ulogu šuma koji se javlja u pozicijskom signalu i može se prepostaviti da sličnu funkciju imaju biološke petlje za integraciju haptičkih informacija (Saunders i Vijayakumar, 2011).

Referentni signali sustava treće razine postavljene su s upravljačke ploče na računalu i predstavljaju ciljanu udaljenost kursora od mete. Teoretski, navedeni referentni signali u ljudskom neuronskom sustavu postavljaju petlje na razini iznad ove. Primjerice, robotski sustav može obavljati zadatak održavanja kursora na 3cm desno i 5 cm ispod mete, ako se referentne razine za x i y podese na 3 i 5 cm. U ovom istraživanju referentne razine su iznosile 0 cm kako bi kurzor bio što bliže središtu mete. Također se može postaviti referentna razina pritiska ruke na miš.

Za razliku od ljudskih mišića i tetiva, elektromotori korišteni kao efektori robota su relativno linearni elementi. Simulacije s realističnim modelima mišića pokazuju da hijerarhijske kontrolne petlje uspješno koriste nelinearne elastične elemente za kontrolu kutne akceleracije i pozicije (Powers, 1999), no potrebno je testirati predložene petlje na ekvivalentnim fizičkim elementima.

Robotska ruka sadrži samo četiri stupnja slobode, i kao takva nije realističan model ljudske ruke. Moguće je da će veći broj stupnjeva slobode ograničiti ili poboljšati uspješnost predložene arhitekture. Simulacije pokazuju da veći broj stupnjeva slobode nema efekt ograničavanja uspješnosti (Powers, 2008), te je potrebno analizirati sustav na fizički realističnjem robotskom modelu s više stupnjeva slobode.

## 5.2. Učinkovitost sustava u odnosu na ispitanike

Daljnja analiza pokazuje da, iako sustav uspješno izvršava zadatku praćenja mete, još uvijek je nešto lošiji od ljudskih ispitanika. Robotski sustav ima statistički značajno manju učinkovitost u svih deset situacija praćenja mete koja se kreće po slučajnoj putanji za obje dimenzije (tablica 1, graf 4,  $p < 0.01$ ), te nije potvrđena treća hipoteza. U prijašnjim istraživanjima (Powers, 1978; Marken 1987, Matić 2011) računalne simulacije kontrolnih sustava s latencijom od 130-150 ms pokazale su uspješnost u praćenju mete na razini ispitanika ili većoj, te se može zaključiti da je razlika između uspješnosti ispitanika i robotskog sustava posljedica senzorskih i mehaničkih ograničenja.

Najveći efekt na preciznost praćenja imalo bi poboljšanje u vidnom sustavu koji se može postići upotrebom kamere veće rezolucije u kombinaciji s bržim računalnim sustavom koji bi mogao procesirati vidne informacije u kraćem vremenu. Konstruirani sustav je, zbog ograničene procesorske snage, koristio rezoluciju kamere od 320x240 piksela, dok se meta na ekranu kretala po području raspona 500x500 piksela, te nije mogao pouzdano utvrditi razlike između položaja mete i kursora manje od oko 3-4 piksela.

Također, kako bi sustav mogao pratiti mete na većoj frekvenciji, potrebno je koristiti nešto snažnije elektromotore koji bi reproducirali dinamičke mogućnosti ljudskih mišića. Korišteni motori nisu bili dovoljno snažni i nisu mogli reagirati dovoljno brzo; za buduće verzije robotskog sustava preporučuje se korištenje većih motora s reduksijskim prijenosom.

### 5.3. Implikacije

Robotski sustav koji bi u potpunosti reproducirao uspješnost ispitanika u zadatku praćenja mete mogao bi se koristiti kao platforma za testiranja različitih teoretskih modela ljudskog senzomotornog sustava ili nekih njegovih segmenata. Primjerice, usporedba izvedbe različitih modela diskriminacije vidnih podražaja s izvedbom ispitanika u istom zadatku mogla bi pružiti dokaze u prilog jednom od modela diskriminacije. Moguće je usporediti modele motoričkog učenja, modele haptičke percepcije ili pak modele propriocepcije. Također je moguće pokušati konstruirati 'više' razine sustava s ciljem reproduciranja složenijih ponašanja ispitanika.

## 6. Zaključak

U ovom istraživanju konstruiran je robotski sustav koji implementira hijerarhiju kontrolnih petlji predloženih teorijom kontrole percepcije; analiziratan je njegov rad i uspoređena učinkovitost izvršavanja zadatka praćenja mete s učinkovitošću ispitanika u istom zadatku.

Analizom frekvencijskih karakteristika sustava, utvrđeno je da sustav uspješno izvršava zadatak uz manje od 10% greške za frekvencije kretanja mete do 1/16 Hz, dok lomne frekvencije iznose 1/4 Hz za x-sustav i 1/8 Hz za y-sustav.

Utvrđeno je da promjena nagiba podloge na  $30^\circ$  ne utječe na uspješnost izvršavanja zadatka praćenja mete u y-sustavu, odnosno da sustav uspješno integrira haptičke informacije.

Sustav je statistički značajno manje učinkovit u zadatku praćenja mete od ispitanika u svih 10 zadatak praćenja mete ( $p < 0.01$ ), što upućuje na moguća senzorska i mehanička poboljšanja.

Robotski sustav koji bi u potpunosti reproducirao ponašanja ispitanika u zadatku praćenja mete mogao bi se koristiti kao platforma za daljnja istraživanja neuronskih struktura koje su u podlozi ljudskog motoričkog ponašanja i senzomotorne integracije.

## 7. Literatura

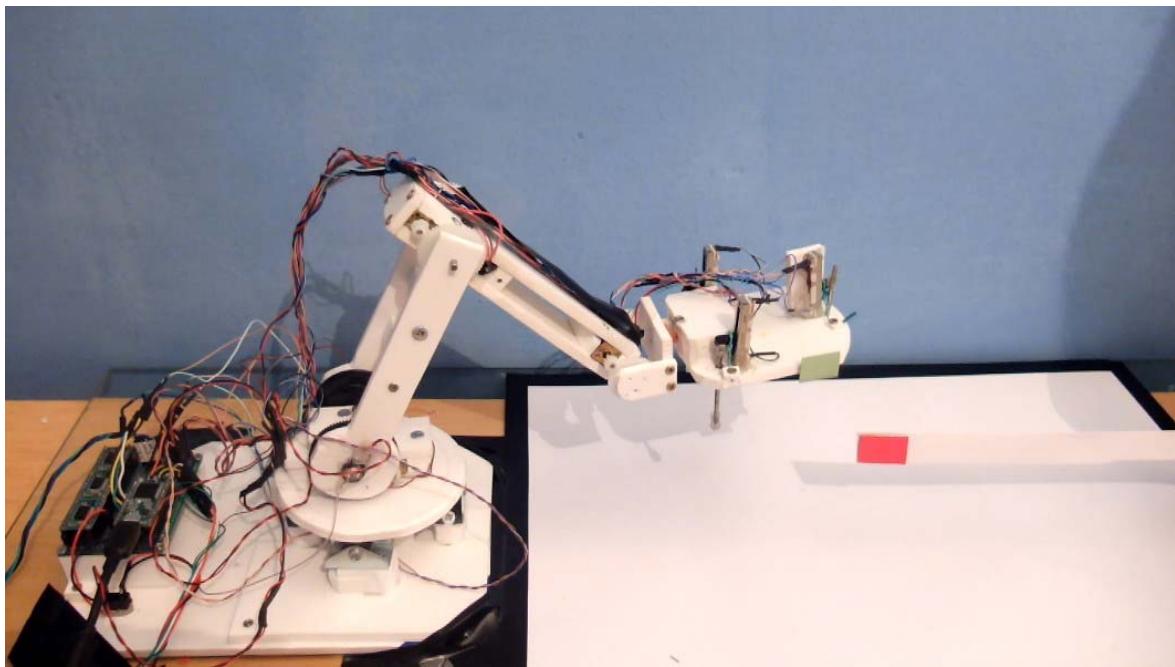
- Bennett, S. (1996). A brief history of automatic control. *IEEE Control Syst. Mag.* 16 3, 17–25
- Bissell, C. (2009). A history of automatic control. In: Nof, Shimon Y. ed. *Springer handbook of automation. Springer handbook series (LXXVI)*. Heidelberg, Germany: Springer Verlag, pp. 53–69.
- Brooks, R.A. (1992.) Articial life and real robots. In F. J. Varela and P. Bourgine,editors, *Proceedings of the First European Conference on Articial Life*, pages 3-10. MIT Press/Bradford Books, Cambridge, MA.
- Bourbon, W. T. (1995). Perceptual control theory. *Comparative approaches to cognitive science*, 151-172.
- Carey, T. A. (2008). Perceptual control theory and the method of levels: Further contributions to a transdiagnostic perspective. *International Journal of Cognitive Therapy*, 1(3), 237-255.
- Carey, T. A. (2008). Conflict, as the Achilles heel of perceptual control, offers a unifying approach to the formulation of psychological problems. *Counselling Psychology Review*, 23, 5-16.
- Cesari, P., Shiratori, T., Olivato, P., & Duarte, M. (2001). Analysis of kinematically redundant reaching movements using the equilibrium-point hypothesis. *Biological cybernetics*, 84(3), 217-226.
- Cisek, P. (1999) Beyond the computer metaphor: Behaviour as interaction. *Journal of Consciousness Studies*. 6(11-12): 125-142
- Cisek, P., Kalaska, J.F. (2010). Neural mechanisms for interacting with a world full of action choices. *Annu Rev Neurosci*. 2010;33:269.
- Crawford, J. D., Medendorp, W. P., & Marotta, J. J. (2004). Spatial transformations for eye-hand coordination. *Journal of neurophysiology*, 92(1), 10-19.
- Cziko, G. (2000). The Things We Do: Using the Lessons of Bernard and Darwin to Understand the What, How, and Why of Our Behavior. *MIT Press*
- Feldman, A. G. (1966). Functional tuning of nervous system with control of movement or maintenance of a steady posture. 2. controllable parameters of muscles. *BIOPHYSICS-USSR*, 11(3), 565.

- Feldman, A. G. (1986). Once more on the equilibrium-point hypothesis ( $\lambda$  model) for motor control. *Journal of motor behavior*, 18(1), 17-54.
- Feldman, A. G., & Levin, M. F. (1995). The origin and use of positional frames of reference in motor control. *Behavioral and Brain Sciences*, 18(04), 723-744.
- Gomi, H., & Kawato, M. (1997). Human arm stiffness and equilibrium-point trajectory during multi-joint movement. *Biological cybernetics*, 76(3), 163-171.
- Georgopoulos, Apostolos P., Andrew B. Schwartz, and Ronald E. Kettner. "Neuronal population coding of movement direction." *Science* 233.4771 (1986): 1416-1419.
- Kaiser, M., Hilgetag, C. C., & Kötter, R. (2010). Hierarchy and dynamics of neural networks. *Frontiers in neuroinformatics*, 4.
- Kawato, M. (2003). Cerebellum and Motor control, in Arbib, M.(ed) *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, MIT Press
- Kawato M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. *Current Opinion in Neurobiology*, 9:718–727
- Haith, A. M., i Krakauer, J. W. (2013). Theoretical models of motor control and motor learning (p. 7). *Routledge handbook of motor control and motor learning*.
- Hart, C. B., & Giszter, S. F. (2010). A neural basis for motor primitives in the spinal cord. *The Journal of Neuroscience*, 30(4), 1322-1336.
- Hayek, F. A. (1976). *The sensory order*. University of Chicago Press.
- Hawkins, J., & Blakeslee, S. (2007). *On intelligence*. Macmillan.
- Mansell, W. (2005). Control theory and psychopathology: An integrative approach. *Psychology and Psychotherapy: Theory, Research and Practice*, 78(2), 141-178.
- Marken, R. S. (1986). Perceptual organization of behavior: A hierarchical control model of coordinated action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12(3), 267.
- Marken, R (1992). Mindreadings: Experimental Studies of Purpose. Durango: Control Systems Group
- Marken, R. S. (2001). Controlled variables: Psychology as the center fielder views it. *American Journal of Psychology*, 114(2), 259-282.
- Marken, R. S. (2002). Looking at behavior through control theory glasses. *Review of general psychology*, 6(3), 260.
- Marken, R. S. (2005) Optical trajectories and the informational basis of fly ball catching, *Journal of Experimental Psychology*. 31, 630 – 634

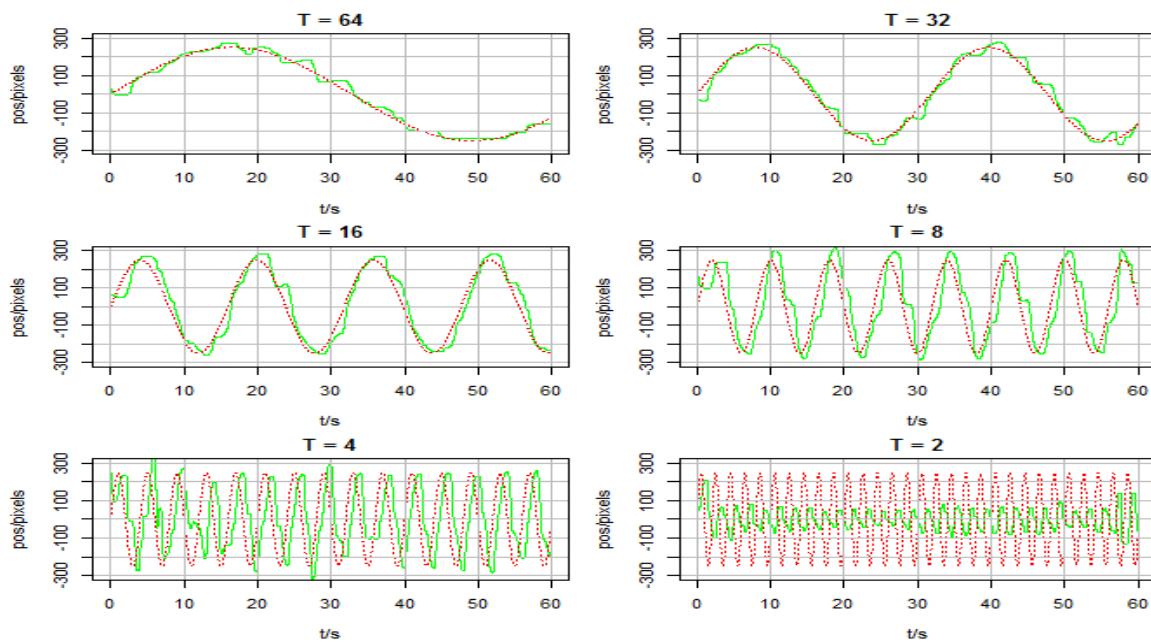
- Matić, A. (2011). Model kontrole percepcije u zadatku praćenja mete u dvije dimenzije. *Sveučilište u Zadru. Prvostupnički završni rad.*
- Merton, P. A. (1953). Speculations on the Servo-Control of Movement. In *Ciba Foundation Symposium-The Spinal Cord* (pp. 247-260). John Wiley & Sons, Ltd..
- McIntyre, J., & Bizzi, E. (1993). Servo hypotheses for the biological control of movement. *Journal of motor behavior*, 25(3), 193-202.
- Miall, R. C. (1995). Motor control, biological and theoretical. *The handbook of brain theory and neural networks*, 597-600.
- Minsky, M. (1988). *Society of mind*. Simon and Schuster.
- O'Brien, J.; & Bracewell, M. (2010). A Brief Historical Review of Motor Control Theory. *Advances in Clinical Neuroscience and Rehabilitation*. 10, ((3)) 22-23.
- Plooij, F. X. (1984). The behavioural development of free-living chimpanzee babies and infants. *Monographs on Infancy No. 3*. Norwood, NJ: Ablex.
- van de Rijt-Plooij, H., & Plooij, F. (1993). Distinct periods of mother-infant conflict in normal development: Sources of progress and germs of pathology. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 34, 229-245
- Powers, W. T. (1978). Quantitative analysis of purposive systems: Some spadework at the foundations of scientific psychology. *Psychological Review*, 85, 417-435.
- Powers, W.T. (1999). A model of kinesthetically and visually controlled arm movement. *Int. J. Human-Computer Studies* (1999) 50, 463}479
- Powers, W. T. (2005). Behavior: The control of perception, 2nd ed. New Canaan, CT: Benchmark.
- Powers, W. T. (2008). Living controls systems III: The fact of control. New Canaan, CT: Benchmark.
- Powers, W. T., Clark, R. K., i McFarland, R. L. (1960). A general feedback theory of human behavior: *Part I. Perceptual and Motor Skills*, 11, 71–88.
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A. S., McNamara, J. O., & White, L. E. Neuroscience, 2008. *De Boeck, Sinauer, Sunderland, Mass.*
- Schweighofer, N., Arbib, M. A., i Kawato, M. (1998). Role of the cerebellum in reaching movements in humans. I. Distributed inverse dynamics control. *European Journal of Neuroscience*, 10(1), 86-94.
- Scott, S. H. (2004). Optimal feedback control and the neural basis of volitional motor control. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(7), 532-546.

- Stein, P. S. G. (2005). Neuronal control of turtle hindlimb motor rhythms. *Journal of Comparative Physiology A*, 191(3), 213-229.
- Ting, L. H., & Macpherson, J. M. (2005). A limited set of muscle synergies for force control during a postural task. *Journal of neurophysiology*, 93(1), 609-613.
- Todorov, E. i Jordan, M.I. (2002.). Optimal feedback control as a theory of motor coordination. *Nature Neuroscience*. 5, 1226–1235
- Turvey, M. T., i Fonseca, S. (2009). Nature of motor control: Perspectives and issues. In *Progress in Motor Control* (pp. 93-123). Springer US.
- Treue S. (2001). Neural correlates of attention in primate visual cortex. *Trends Neurosci*. 24(5):295–300
- Young, R. (2000). Visual Control in Natural and Artificial Systems. *University of Surrey, Phd thesis*
- Wiener, N. (1948) *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Wiley.
- Wolpert, D. M., i Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature Neuroscience*, 3, 1212-1217.
- Wolpert, D. M., i Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*, 11(7), 1317-1329.

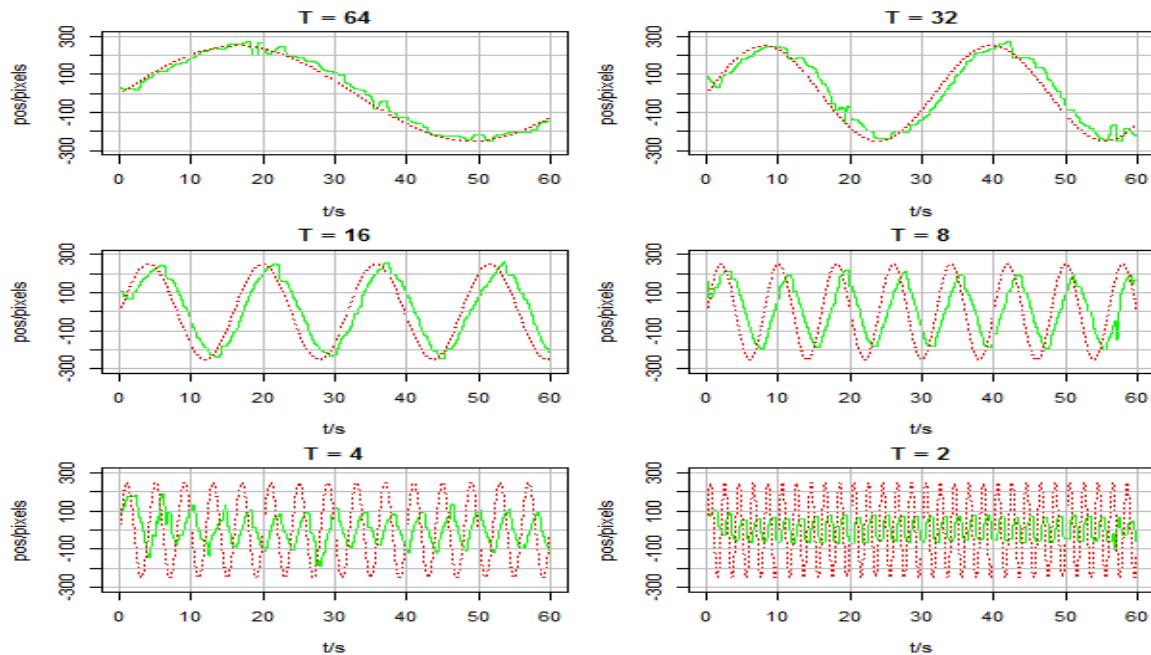
**PRILOG 1. Slika robotskog sustava konstruiranog u ovom istraživanju**



## PRILOG 2 – Bruto rezultati frekvencijske analize robotskog sustava

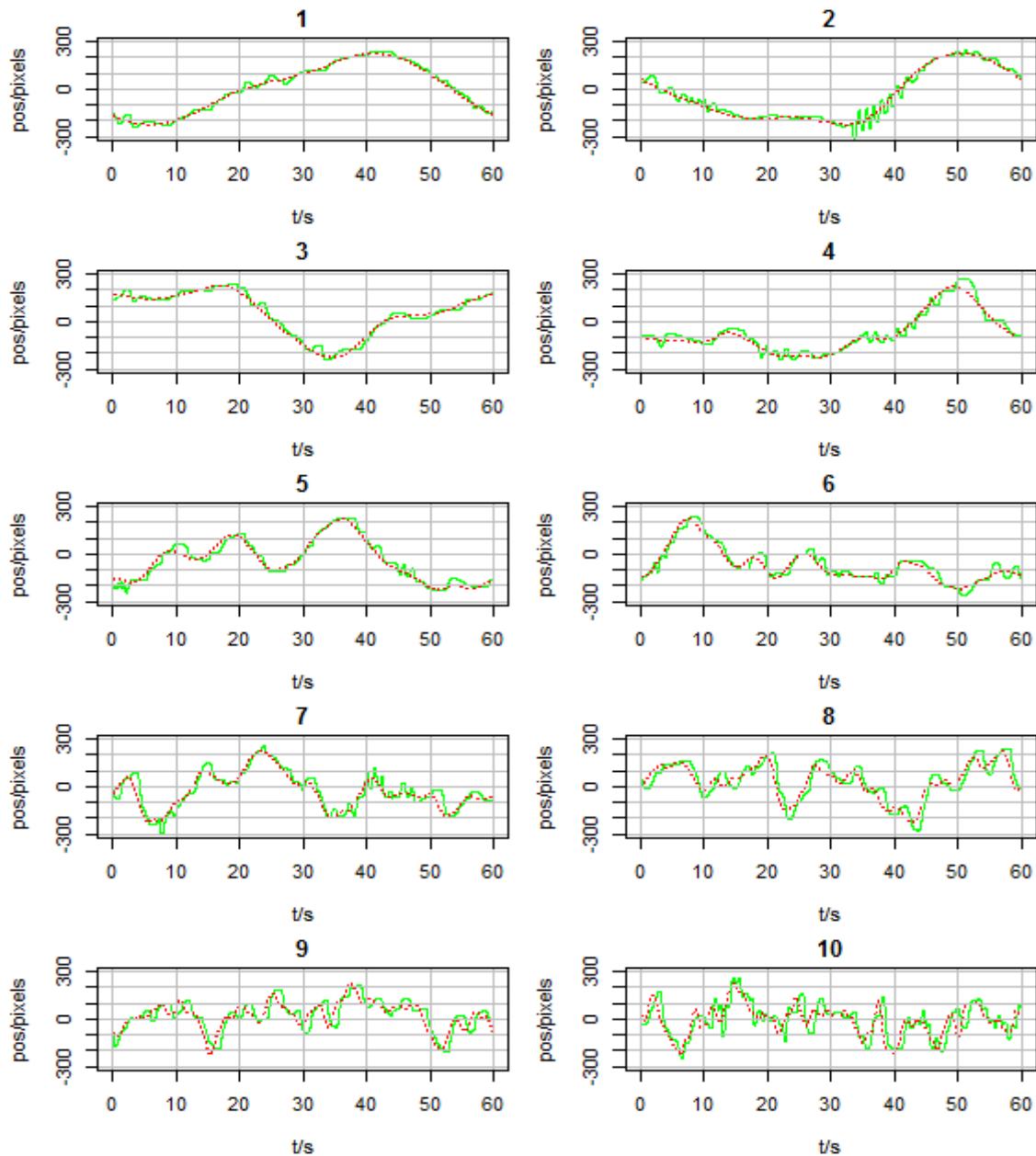


Slika 1. Putanje mete i kursora u x dimenziji za različite periode T sinusoidnog vala po kojemu se kretala meta

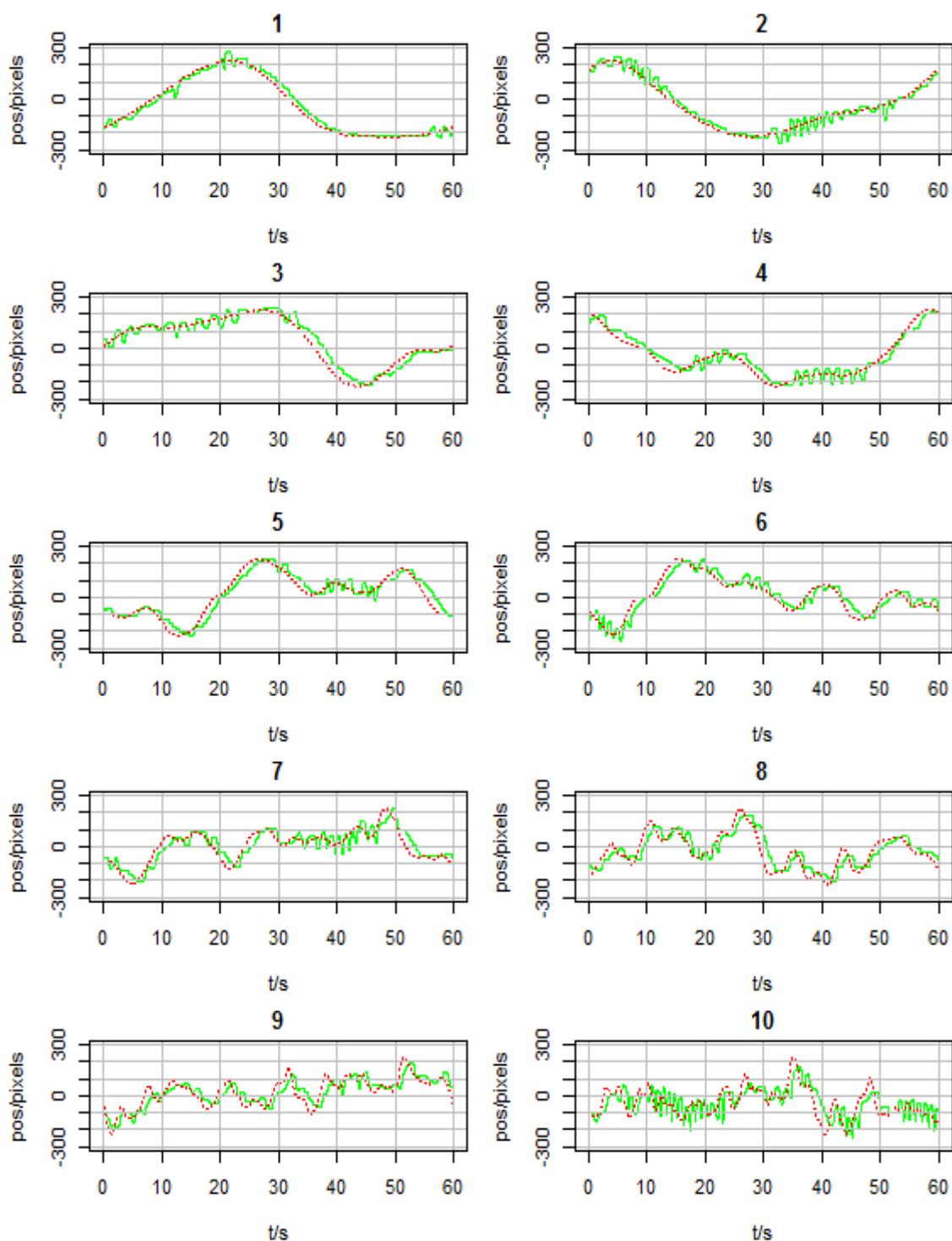


Slika 2. Putanje mete i kursora u y dimenziji za različite periode T sinusoidnog vala po kojemu se kretala meta

**PRILOG 3. Bruto rezultati mjerjenja robotskog sustava u situaciji  
praćenja mete koja se kreće po slučajnoj putanji**



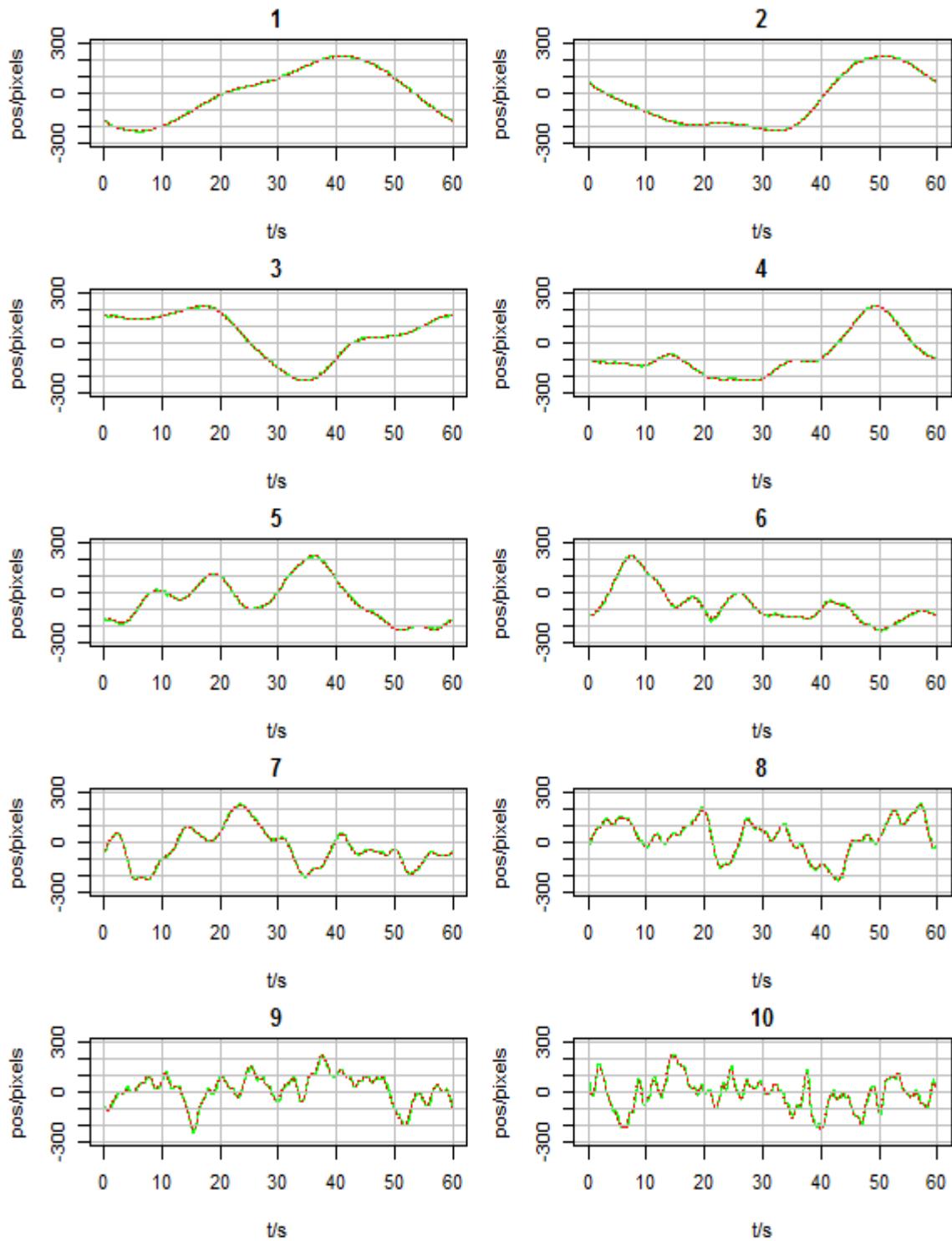
*Slika 1. x dimenzija*



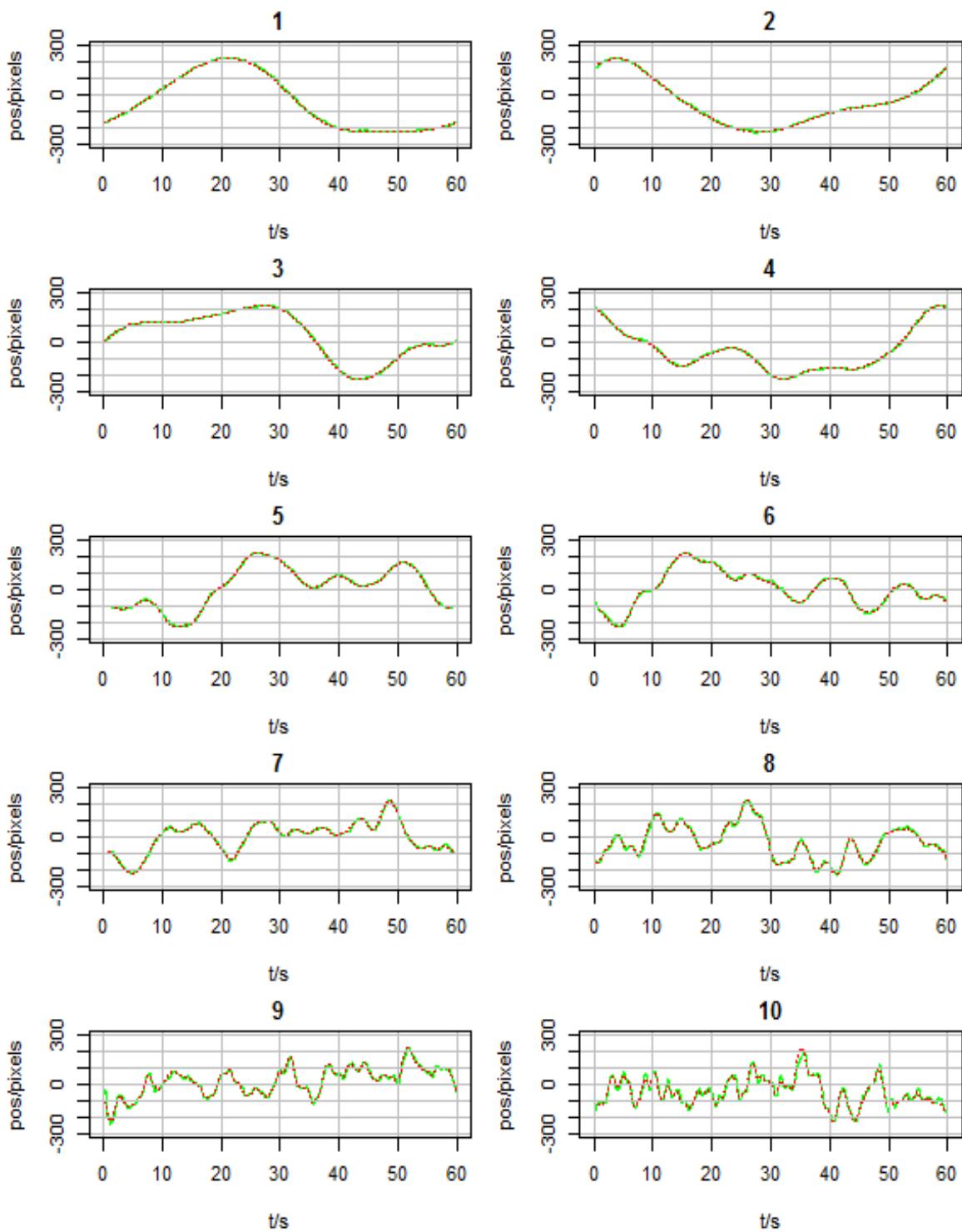
*Slika 2. y dimenzija*



**PRILOG 4. Bruto rezultati mjerjenja za ispitanika br. 4 u situaciji  
praćenja mete koja se kreće po slučajnoj putanji**



*Slika 1. ispitanik 4, x dimenzija*



Slika 2. ispitanik 4, y dimenzija