

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Филипа Бечановића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 1630-17 од 07.11.2023. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Филипа Бечановића под насловом

### **Откривање оптималних стратегија у људском кретању путем инверзног оптималног управљања**

и са насловом на енглеском језику који гласи

**Uncovering optimal strategies in human motion using inverse optimal control**

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

## РЕФЕРАТ

### 1. УВОД

#### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Филип Бечановић је 02.11.2020. године уписао докторске академске студије Електротехнике и рачунарства, модул Управљање системима и обрада сигнала, на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Све испите положио је са највишом оценом и испунио је све обавезе везане за студијски истраживачки рад предвиђене планом и програмом, а тиме стекао право за подношење докторске дисертације на преглед и оцену.

Кандидат је 01.06.2023. године пријавио тему докторске дисертације под називом „Откривање оптималних стратегија у људском кретању путем инверзног оптималног управљања“.

Комисија за студије трећег степена, 06.06.2023. године, разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и упутила Наставно-научном већу предлог за именовање Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду је 13.06.2023. године, на својој 887. седници, одлуком бр. 883-34 именовало Комисију за оцену научне заснованости теме докторске дисертације у следећем саставу:

1. др Милица Јанковић, ванредни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,

2. др Драган Мирков, редовни професор, Универзитет у Београду - Факултет спорта и физичког васпитања,
3. др Ненад Јовићић, ванредни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,
4. др Маја Трумић, научни сарадник, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет.

За менторе докторске дисертације предложени су др Коста Јовановић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет , и др Samer Mohammed, редовни професор, Универзитет Paris-Est Créteil, у складу са билатералним програмом докторских студија између Универзитета у Београду – Електротехничког факултета и Универзитета Paris-Est Créteil, у Паризу, Француској.

Јавна усмена одбрана теме докторске дисертације кандидата је одржана на Електротехничком факултету у Београду дана 20.06.2023. године пред комисијом у претходно наведеном саставу. Комисија је једногласно закључила да је кандидат Филип Бечановић на јавној усменој одбрани предложене теме добио оцену „задовољио“. Заједно са предложеним менторима докторске дисертације, комисија је поднела Извештај за оцену научне заснованости теме докторске дисертације.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду је 04.07.2023. године, на својој 888. седници, одлуком бр. 997-17 усвојило Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације у следећем саставу.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је на својој седници одржаној 11.09.2023. године, одлуком бр. 61206-3052/2-23 дало сагласност на Одлуку Наставно-научног већа Електротехничког факултета о приhvатању теме докторске дисертације Филипа Бечановића, под називом „Откривање оптималних стратегија у људском кретању путем инверзног оптималног управљања“ и о одређивању проф. др Косте Јовановића, ванредног професора, Универзитета у Београду – Електротехничког факултета и проф. др Samer Mohammed-a, редовног професора, Универзитета Paris-Est Créteil за менторе.

Кандидат је 02.10.2023. године предао урађену докторску дисертацију на преглед и оцену.

Комисија за студије трећег степена је на својој седници 31.10.2023. године потврдила испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду је 07.11.2023. године, на својој 891. седници, одлуком бр. 1630-17 именовало Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у следећем саставу:

1. др Жељко Ђуровић, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,
2. др Милица Јанковић, ванредни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,
3. др François Charpillet, научни саветник, Национални институт за истраживање у дигиталним наукама и технологији, INRIA, Нанси, Француска,
4. др Vincent Padois, научни саветник, Национални институт за истраживање у дигиталним наукама и технологији, INRIA, Бордо, Француска.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада научној области Електротехнике и рачунарства за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду и Универзитет Paris-Est Créteil. Дисертација припада ужој научној области аутоматике. Главни фокус дисертације су биле примене метода модерне аутоматике засноване на подацима, под здруженим називом „инверно оптимално управљање“, зарад анализе људске координације на нивоу удова и на нивоу мишића током покрета.

Први ментор докторске дисертације др Коста Јовановић изабран је за ванредног професора за ужу научну област Аутоматика на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Ментор има вишегодишње истраживачко и наставно искуство у домену аутоматике, роботике и биомеханике.

Други ментор докторске дисертације др Samer Mohammed изабран је за редовног професора на Универзитету Paris-Est Créteil. Ментор има вишегодишње истраживачко искуство у домену аутоматике, „носивих“ робота и рехабилитације.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Филип Бечановић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, рођен је 04.12.1997. године у Београду. Основну школу делимично је похађао у Београду, у школи 20. Октобар, а завршио је у Паризу, Француској, у колежу Жансон де Саји (Collège Janson de Sailly). Средњу школу започео је у Паризу, у лицеју (Lycée) по истом имену, а завршио је девету београдску гимназију, Михаило Петровић Алас. Основне академске студије на Електротехничком факултету у Београду уписао је 2015. године. Дипломирао је на одсеку за Сигнале и системе 2019. године са просечном оценом 9.42 одбравнивши дипломски рад под називом „Локализација робота у познатом окружењу коришћењем честичног филтера“. Мастер академске студије на Електротехничком факултету у Београду уписао је 2019. године, а завршио је 2020. године са просечном оценом 9.33 одбравнивши мастер рад „Анализа људског покрета употребом инверзног оптималног управљања“.

Током основних студија одрадио је стручну праксу у развојном центру компаније Мајкрософт (Microsoft) у Београду у трајању од четири месеца. Током мастер студија, одрадио је истраживачку праксу у Паризу у Лабораторији за слике, сигнале и интелигентне системе - LISSI (Laboratoire des Images, Signaux et Systèmes Intelligents - LISSI) Универзитета Paris-Est Créteil (Université Paris-Est Créteil) у трајању од шест месеци, у оквиру Еразмус+ програма размене студената.

Двојне докторске академске студије уписао је 2020. године на Електротехничком факултету у Београду и на Универзитету Paris-Est Créteil. Област научног истраживања кандидата обухвата примену оптимизационих алгоритама за планирање покрета код хуманоидних механичких структура, као и примену инверзног оптималног управљања као методу учења покрета из примера. Од јануара 2021. године ангажован је као истраживач приправник на Електротехничком факултету у Београду. У току докторских студија остварио је два петомесечна истраживачка боравка у Тулузу, Француској, у истраживачком тиму за хуманоидне роботе Ђепето (Gepetto) Лабораторије за анализу и архитектуру система (LAAS-CNRS) током 2022. и 2023. године.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### **2.1. Садржај дисертације**

Докторска дисертација под насловом „Откривање оптималних стратегија у људском кретању путем инверзног оптималног управљања“ (енглески: *Uncovering optimal strategies in human motion using inverse optimal control*) написана је 112 стана на енглеском језику, у складу са Споразумом о билатералним докторским студијама.

У форми и структури потпуно одговара Упутству за обликовање докторске дисертације Универзитета у Београду.

Делови дисертације су:

- Насловна страна на енглеском језику,
- Насловна страна на српском језику,
- Насловна страна на француском језику,
- Страна са информацијама о менторима и члановима комисије,
- Изјава захвалности,
- Стране са апстрактом и подацима о докторској дисертацији на енглеском језику,
- Стране са апстрактом и подацима о докторској дисертацији на српском језику,
- Стране са апстрактом и подацима о докторској дисертацији на француском језику,
- Садржај,
- Текст дисертације по поглављима:
  - Увод,
  - Инверзно оптимално управљање,
  - Ограничавање грешака путем полиномијалне оптимизације,
  - Расподела сила током хода,
  - Дизајн кутије,
  - Закључак и правци даљег истраживања.
- Списак коришћених скраћеница,
- Списак слика,
- Списак табела,
- Списак алгоритама,
- Списак коришћене литературе,
- Текст прилога А.

Дисертација садржи 26 слика, 10 табела и списак коришћене литературе који садржи 150 библиографских јединица.

### **2.2. Кратак приказ појединачних поглавља**

Прво поглавље истиче предмет ове дисертације која разматра употребу технике инверзног оптималног управљања за идентификацију оптимизационих модела људских покрета, и наглашава кључне идеје и мотивацију за рад на овој теми. У поглављу се разматра потреба и значај бољег разумевања људске моторне контроле у циљу напредовања у области роботске аутоматизације и развоју ефикаснијих технологија за здравство и рехабилитацију. Такође, представљен је преглед истраживања у области оптимизационог моделирања људских покрета која служе као потпора овом истраживању, као и главне хипотезе на којима се заснива тренутно истраживање. Такође, део поглавља пружа увид у структуру и садржај остатка дисертације.

Друго поглавље обухвата преглед примене инверзног оптималног управљања у анализи људских покрета, са освртом на његов развој и разноврсне методологије, наглашавајући метод двонивоске оптимизације и инверзну Каруш-Кун-Такерову методу. Ово поглавље детаљно разматра инверзно оптимално управљање, стварајући теоријску основу за разумевање њене комплексне, скуповне и нелинеарне регресионе природе. Поред тога, уводе се кључни концепти попут Каруш-Кун-Такерових услова и усклађености модела са подацима, истовремено истичући метод двонивоске оптимизације као преферирани приступ за будуће истраживања и примену у овом домену.

Треће поглавље представља допринос инверзном оптималном управљању за моделе квадратног програмирања. Описује нову методологију за израчунавање доњих граница грешке у инверзном оптималном управљању, која служи као основа за нови процес одабира базисних оптимизационих функција. У овом поглављу се детаљно анализирају базисне оптимизационе функције и аналитичка својства скупова глобалних оптимума у моделима квадратног програмирања, како у неограниченом, тако и у ограниченим условима. Такође, уводе се алгоритми за одређивање доњих граница грешака у инверзном оптималном управљању засновани на употреби семидефинитног програмирања. Овај рад не само да побољшава разумевање инверзног оптималног управљања у моделима квадратног програмирања, већ и отвара путеве за будућа истраживања, посебно у методама одабира базисних оптимизационих функција. Представља основу и за будуће методе засноване на релаксацијама проблема инверзног оптималног управљања на два нивоа.

Четврто поглавље се бави применом инверзног оптималног управљања за моделирање расподеле мишићних сила током хода, што је важан проблем у биомеханици и истраживањима у области рехабилитације. Коришћењем јавно доступних података о мереним мишићним сила у доњим удовима човека током хода, двонивоском методом инверзног оптималног управљања се идентификује оптимизациони модел који прецизно предвиђа мишићну силу током хода и из које се касније процењује крутост зглобова. Истичу се предности двонивоске методе инверзног оптималног управљања у односу на инверзну Каруш-Кун-Такерову методу, на основу темељне анализе и упоређивања предикције идентификованих модела оба типа. Такође, у овом поглављу истичу се ограничења идентификованог модела за предвиђање мишићне сile, посебно у погледу потцењивања ко-контракција, указујући на потребу за свеобухватнијим базисним оптимизационим функцијама. Поред тога, откривају се увиди у тежњу централног нервног система да минимализује активације мишића и мишићну снагу, што имплицира значајну проприоцептивну компоненту у контроли мишића, јер обе величине зависе од тренутног стања мишића.

Пето поглавље детаљно се бави предикцијом зглобних трајекторија код човека приликом задатка подизања кутије, што је важан задатак у истраживањима ергономије и дизајна радног места. У овом поглављу детаљно се прегледају приступи предикцији засновани на оптимизационим моделима, при чему се представљају кључна оптимизациона ограничења и оптимизационе функције коришћене у таквим моделима кретања. У раду се користи биомеханички модел у сагиталној равни са шест степени слободе како би се описала конфигурација човеког тела, а трајекторије се реконструишу и динамички параметри модела идентификују на основу података добијених из експеримената са системом за хватање кретања и платформом за мерење сile. Зарад идентификације оптимизационог модела који најпрецизније репродукују човеколико понашање, употребљено је двонивоско инверзно оптимално управљање. Оптимизациони модел идентификован је коришћењем само једне мерене трајекторије, међутим постоје различити нивои тачности у предвиђањима зглобних трајекторија. Резултати дакле указују на потребу за сложенијим и описнијим оптимизационим функцијама како би се повећала тачност предвиђања покрета подизања.

Последње поглавље је закључак. У њему се предлаже употреба двонивоске методе инверзног оптималног управљања пре него инверзне Каруш-Кун-Такерове методе, наводећи њену супериорност у раду са шумом у мерењима и неизвесностима модела. Иако истраживање показује способност инверзног оптималног управљања да ухвати поједине образце људских кретања, истовремено указује на значајне недостатке, као што је потреба за ефикаснијим методама одабира базисних оптимизационих функција и истраживањем својства глобалних оптимума у биомеханичким моделима. У поглављу се наглашава рачунарска комплексност двонивоског инверзног оптималног управљања као главно ограничење, указујући на потребу за напретком у методама решавања и развоју софтвера.

Прилог А приказује пример дискретизације простора стања у облику н-димензионалног симплекса и даје се алгоритам који генерише равномерну расподелу тачака на симплексу.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Проучавање инверзног оптималног управљања представља значајан правац у области роботике и биомеханике, одражавајући савремени спој комбиновања вештачке интелигенције са практичним применама. Овај приступ у суштини инвертује традиционалну парадигму оптималног управљања, настојећи да разазна основну циљну функцију коју систем покушава да оптимизује, на основу уоченог понашања. Ово је посебно важно у роботици, где је разумевање и реплицирање доношења одлука и покрета сличних човеку кључно за стварање прилагодљивијих, ефикаснијих и интуитивнијих робота. Инверзно оптимално управљање, поред своје кључне улоге у роботици, налази критичну примену у различитим доменима као што је аутономна навигација возила, где помаже у разумевању и опонашању човека у вожњи, и у економији и друштвеним наукама за моделирање и предвиђање процеса људског доношења одлука у сложеним сценаријима.

Актуелност ове области лежи у њеној интердисциплинарној природи, мешању концепата из теорије управљања, машинског учења и когнитивне науке. Како роботски системи постају све сложенији и аутономнији, инверзно оптимално управљање обезбеђује оквир за ове системе да уче из људског понашања, чиме се побољшавају њихове перформансе и могућности интеракције. Студија инверзног оптималног управљања одражава шири тренд у академској заједници ка истраживању које не само да помера границе теоријског разумевања, већ има и непосредне, опипљиве примене у побољшању интеракција између људи и технологије.

Важност разумевања индивидуалних људских покрета на биомеханичком нивоу не може се преценити, посебно за напредак у области роботике. Сваки покрет обухвата сложену оркестрацију неуронских, мишићних и скелетних интеракција, нудећи увид у суптилности људског покрета. Схватање ових феномена је кључно за развој робота који могу обављати задатке са нивоом спретности и флуидности сличним људима. Сходно томе, увид у покрете ногу помаже у стварању агилнијих и стабилнијих двоножних робота. На нивоу целог тела, ово знање је кључно за развој хуманоидних робота способних да се крећу у различitim окружењима и да помогну у задацима почевши од од неге старих људи до деловања у окружењима природних катастрофа. Овај фокус на опонашању планирања људског покрета није само физичка репликација; ради се о утрађивању робота са способношћу предвиђања, прилагођавања и реаговања на начине који су у основи људски.

Оригиналност дисертације огледа се у проучавању савремених метода инверзног оптималног управљања, у проучавању и њиховом употребљавању у контексту биомеханике човека, као и

у доприносу који се притом даје. Оригиналност се огледа у новоразвијеном методу проналажења доње границе грешке приликом инверзног оптималног управљања за моделе квадратног програмирања, коришћењем семидефинитног програмирања. Такође, огледа се у упоредној анализи двонивоске методе и инверзне методе Каруш-Кун-Такера, две популарне методе у литератури. Употреба инверзног оптималног управљања на задатак расподеле мишићних сила такође представља велику новину јер се инверзно оптимално управљање није користило за анализе на мишићном нивоу. Оригиналан допринос представља и примена инверзног оптималног управљања у идентификацији оптимизационог модела за генерисање покрета дизања кутије.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији је наведено 150 релевантних библиографских референци. Кандидат је проучио литературу из области оптимизационог моделирања људских покрета, како са опште тачке гледишта, тако и са тачке гледишта појединачно изучених проблема расподеле мишићних сила током хода и проблема генерисања покрета дизања кутије. Кандидат је показао и познавање литературе из области инверзног оптималног управљања, хронолошки пратећи развој различитих метода из ове области. Кандидат за докторску дисертацију је изложио широк распон литературе, укључујући значајне публикације у престижним међународним часописима и документа са важних конференција, који обухватају од основних теоријских поставки до најновијих истраживања у области. Прегледом његове тезе и анализом коришћене литературе, видљиво је да су његови оригинални научни прилози ефикасно уклопљени у постојећи научни контекст, показујући тако истинску дубину и ширину његовог истраживачког рада.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У докторској дисертацији коришћене су адекватне инжењерске и научне методе (засноване на релевантној литератури) које се тичу теорије оптимизације и биомеханичког моделирања. У докторској дисертацији, употребљене су бројне методе методе:

- елементи теорије оптимизације као што су Каруш-Кун-Такерови услови, конвексна оптимизација, квадратно програмирање, нелинеарно програмирање, семидефинитно програмирање, мултиваријабилна оптимизација, и двонивоска оптимизација;
- поједностављење двонивоске оптимизације на једнонивоску код конвексних проблема квадратног програмирања путем Каруш-Кун-Такерових;
- коришћење претпоставке стриктне конвексности код проблема квадратног програмирања како би се доказала аналитичка својства параметричког скупа његових минимума;
- имплементација двонивоско методе и инверзне Каруш-Кун-Такерове методе за инверзну оптимизацију модела квадратног програмирања;
- имплементација методе за налажење доње границе поступка инверзног оптималног управљања код модела квадратног програмирања решавањем семидефинитног програма;
- имплементација оптимизационог модела расподеле мишићних сила са многоструким биомеханичким оптимизационим функцијама;
- имплементација двонивоске методе и инверзне Каруш-Кун-Такерове методе за инверзну оптимизацију, и њихова примена на савременим мерењима мишићних сила приликом ходања како би се идентификовали биомеханички оптимуми којима човек тежи;

- кинематско и динамичко моделирање човековог тела коришћењем типичних биомеханичких модела, и имплементација директне кинематике и инверзне динамике Њутн-Ојлеровом методом;
- дизајн експеримента и мерење човекових покрета помоћу типичне биомеханичке поставке система за хватање покрета и платформе за мерење сile;
- кинематска и динамичка идентификација на основу података прикупљених помоћу система за хватање покрета и платформе за мерење сile коришћењем нелинеарне технике најмањих квадрата;
- моделирање зглобних трајекторија сплајн функцијама и генерисање трајекторија дизајна кутија оптимизацијом различитих оптимизационих функција;
- имплементација двонивоске оптимизације која проналази отежњену сложену оптимизациону функцију која најбоље описује измерено људско кретање приликом дизајна кутије.

Кандидат је кроз горе-наведене ставке показао високи ниво способности у математичком моделирању феномена везаних за проучавање људског кретања. Кандидат је показао и солидно владање концептима из теорије оптимизације. Штавише, кандидат је показао способност да конструише и имплементира софтверска решења ослањајући се на савремени софтвер за оптимизацију различите природе, као што је софтвер за квадратно програмирање, нелинеарно програмирање или семидефинитно програмирање.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Ова докторска дисертација се заснива на идеји да се коришћењем одређених измерених људских покрета могу унапредити биомеханички оптимизациони модели предикције тог покрета, а инверзно оптимално управљање је одабрано као скуп савремених алата за остваривање тог циља.

Из дисертације произашао је метод проналaska доње границе грешке у процесу инверзног оптималног управљања код модела квадратног програмирања коришћењем семидефинитног програмирања. Такође, из дисертације произашао је идентификовани оптимизациони модел расподеле мишићних сила у доњим удовима приликом хода човека, који се може употребити у егзоскелетима и рехабилитационим уређајима за предикцију мишићних сила и зглобних крутости. Идентификовани оптимицаони модел људског покрета дизајна кутије може се применити за симулацију човековог покрета у ергономским анализама радног окружења, или за предикцију човекове трајекторије од стране робота у заједничком окружењу.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Током докторских студија, кандидат је истакао способности и особине које су кључне за самостални научно-истраживачки рад. Он је комбиновао аналитичко истраживање стручне литературе са разумевањем и применом теоријских и практичних концепата. Показао је способност да дефинише научне проблеме и приступа њиховом решавању на систематичан начин. Осим тога, демонстрирао је вештину у развоју симулационих модела и њиховој имплементацији на рачунару, као и у анализи и обради добијених резултата. Радећи на моделирању људских покрета, кандидат је спојио резултате из различитих области као што су биомеханика, оптимизација и управљање системима. Резултати кандидатовог рада успешно су презентовани на међународној конференцији и публиковани у научном часопису.

Сходно томе, Комисија сматра да је кандидат достигао ниво самосталности неопходан за даљи научно-истраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### **4.1. Приказ остварених научних доприноса**

Један од основних доприноса ове дисертације је преглед инверзног оптималног управљања као технике за идентификацију и учење модела оптималног управљања за моделирање човекових покрета и задатака из човекове биомеханике.

Први од доприноса ове дисертације је метод проналаска доње границе грешке у процесу инверзног оптималног управљања код модела квадратног програмирања коришћењем семидефинитног програмирања. Овај резултат представљен је на једној од водећих међународних конференција из области аутоматике *IEEE Conference on Decision and Control* 2022. године (M33).

Главни допринос ове дисертације је идентификовани оптимизациони модел расподеле мишићних сила у доњим удовима приликом хода човека, као и детаљна анализа његових предикција на доступном скупу података, како на нивоу мишићних сила, тако и на нивоу зглобних крутости. Резултати овог истраживања су публиковани у врло угледном међународном часопису из области роботике *IEEE Robotics and Automation Letters* 2023. године (M22).

Последњи допринос ове дисертације представља идентификовани оптимицаони модел људског покрета дизања кутије, који даје предикције зглобних трајекторија на нивоу целог тела. Резултати овог истраживања нису публиковани.

### **4.2. Критичка анализа резултата истраживања**

Тема дисертације је актуелна и заснована на савременим развојима у областима моделирања и анализе људских покрета, као и инверзног оптималног управљања. Значајнији доприноси ове дисертације груписани су по поглављима, а поједини доприноси исијавају кроз посматрање више поглавља.

Предмет селекције базисних оптимизационих функција у оквиру инверзног оптималног управљања је актуелан, али ослабо обрађен. Кроз приступ базиран на употреби семидефинитног програмирања за релаксацију двонивоског проблема инверзног оптималног управљања са квадратним моделом и последичном проналажењу доње границе грешке поступка инверзног оптималног управљања, ова дисертација приказује алгоритам за селекцију базисних оптимизационих функција. Самим тим, дисертација прилаже оригиналан допринос области инверзног оптималног управљања. Ограниччење овог приступа јесте што је дефинисан само за квадратне моделе директном оптималном управљању, међутим детаљно су представљени правци за развој и унапређивање ове методологије за шире класе директних модела.

Досадашња истраживања у области инверзног оптималног управљања нису се бавила упоређивањем методе двонивоске оптимизације и инверзне Каруш-Кун-Такерове методе, осим квалитативно по количини рачунарске моћи неопходне за извођење и једне и друге. У том погледу, ова дисертација се показује као прагматична и приказује резултате и једне и друге методе на неколико нумеричких примера, као и на прецизно дефинисаном практичном проблему расподеле мишићне сile. Овом анализом, дисертација јасно показује предности двонивоске методе и залаже се за њену употребу пре него употребу инверзне Каруш-Кун-Такерове методе.

Посебног значаја је примена инверзног оптималног управљања за анализу човекове моторике на мишићном нивоу, која је међу првим студијама ове врсте. Анализа предикција идентификованог модела расподеле мишићних сила у доњим удовима током човековог хода показује да идентификовани модел са сложеном оптимизационом функцијом даје боље предикције од модела са појединачним оптимизационим функцијама. Такође, чињеница да највећу тежину у директном моделу расподеле мишићних сила имају минимизација мишићне активације и мишићне снаге указује на фундаменталну чињеницу да централни нервни систем одређује мишићне силе на основу знања о тренутном контрактивном стању тих мишића.

Примена инверзног оптималног управљања за анализу покрета дизања кутија, који укључује цело тело и који садржи комплексна оптимизациона ограничења као што су бипедална стабилност и избегавање колизија, представља оригиналност у односу на досадашња истраживања. Дисертација садржи комплетан биомеханичко-инжењерски приступ, почевши од поступка прикупљања података, а наставивши са њиховом детаљном обрадом, идентификацијом кинематског и динамичког модела, отпимизационог моделирања трајекторија, као и имплементацију двонивоског инверзног оптималног управљања. Иако су методолошки доприноси у моделирању покрета дизања кутије присутни, тачност модела на појединачним трајекторијама из скupa подата у најбољем случају је еквивалентна савременим моделима, а не надмашује је. Сходно томе, Комисија предлаже будуће унапређивање ове студије и публикацију резултата у научном часопису.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси на којима се заснива ова дисертација публиковани су у следећим радовима који су објављени у међународном часопису (1 рад) и у зборнику са међународне конференције (1 рад):

Рад објављен у научном часопису међународног значаја:

**F. Bečanović**, V. Bonnet, R. Dumas, K. Jovanović and S. Mohammed, "Force Sharing Problem During Gait Using Inverse Optimal Control," IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 8, no. 2, pp. 872-879, Feb. 2023, Impact Factor: 5.2, doi: 10.1109/LRA.2022.3217398. (**M22**).

Рад објављен у зборнику са међународне конференције:

**F. Bečanović**, J. Miller, V. Bonnet, K. Jovanović and S. Mohammed, "Assessing the Quality of a Set of Basis Functions for Inverse Optimal Control via Projection onto Global Minimizers," 2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC), Cancun, Mexico, 2022, pp. 7598-7605, doi: 10.1109/CDC51059.2022.9993342. (**M33**).

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

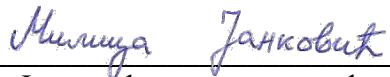
Комисија сматра да докторска дисертација Филипа Бечановића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под насловом „Откривање оптималних стратегија у људском кретању коришћењем инверзног оптималног управљања“, испуњава све суштинске и формалне услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета. На основу свега изложеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се докторска дисертација под насловом „Откривање оптималних стратегија у људском кретању коришћењем инверзног оптималног управљања“, кандидата Филипа Бечановића прихвati, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 22.11.2023. године

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Желько Ђуровић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Милица Јанковић, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др François Charpillet, научни саветник  
INRIA, Нанси, Француска



др Vincent Padois, научни саветник  
INRIA, Бордо, Француска

## TO THE TEACHING AND SCIENTIFIC COUNCIL

**Subject:** Report on the completed doctoral dissertation of the candidate Filip Bečanović, Master of Electrical Engineering and Computing

By the decision of the Teaching and Scientific Council of the School of Electric Engineering, University of Belgrade, No. 1630-17 dated November 7, 2023, we were appointed as members of the Committee for the review, evaluation, and defense of the doctoral dissertation of the candidate Filip Bečanović titled:

### **Uncovering optimal strategies in human motion using inverse optimal control**

After reviewing the submitted Dissertation and other accompanying materials, and discussing with the Candidate, the Committee has compiled the following

## **R E P O R T**

### **1. INTRODUCTION**

#### 1.1. Chronology of the approval and creation of the dissertation

Filip Bečanović enrolled in the doctoral academic studies of Electrical Engineering and Computing, in the Systems Control and Signal Processing module, at the School of Electric Engineering, University of Belgrade, on November 2, 2020. He passed all the exams with the highest grade and fulfilled all the obligations related to the research work as per the plan and program, thereby earning the right to submit the doctoral dissertation for review and evaluation.

The Candidate announced the topic of his doctoral dissertation on June 1, 2023, titled "Uncovering optimal strategies in human motion using inverse optimal control".

The Committee for Third Degree Studies of the the School of Electric Engineering, University of Belgrade, on June 6, 2023, considered the proposed topic for the doctoral dissertation and referred a proposal to the Teaching and Scientific Council for the appointment of the Committee for the evaluation of the scientific basis of the doctoral dissertation topic.

The Teaching and Scientific Council of the School of Electric Engineering, University of Belgrade, at its 887th session held on June 13, 2023, by decision No. 883-34, appointed the Committee for the evaluation of the scientific basis of the doctoral dissertation topic, consisting of:

1. Dr. Milica Janković, Associate Professor at the University of Belgrade - School of Electric Engineering;
2. Dr. Dragan Mirkov, Full Professor at the University of Belgrade - Faculty of Sports and Physical Education;
3. Dr. Nenad Jovičić, Associate Professor at the University of Belgrade - School of Electric Engineering;

4. Dr. Maja Trumić, Research Associate at the University of Belgrade - School of Electric Engineering.

For the supervisors of the doctoral dissertation, Dr. Kosta Jovanović, Associate Professor at the University of Belgrade – School of Electric Engineering, and Dr. Samer Mohammed, Full Professor at the University Paris-Est Créteil, were proposed in accordance with the bilateral program of doctoral studies between the University of Belgrade – School of Electric Engineering and the University Paris-Est Créteil in Paris, France.

The public oral defense of the doctoral dissertation topic by the Candidate was held at the School of Electric Engineering in Belgrade on June 20, 2023, before the committee in the previously mentioned composition. The Committee for the evaluation of the scientific basis of the doctoral dissertation topic unanimously concluded that the Candidate Filip Bečanović satisfied the requirements at the public oral defense of the proposed topic. Along with the proposed supervisors of the doctoral dissertation, the committee submitted a Report for the evaluation of the scientific basis of the doctoral dissertation topic.

The Teaching and Scientific Council of the School of Electric Engineering in Belgrade, at its 888th session held on July 4, 2023, by decision No. 997-17, adopted the Report of the Committee for the evaluation of the scientific basis of the doctoral dissertation topic.

The Council of Scientific Fields of Technical Sciences at the University of Belgrade, at its session held on September 11, 2023, by decision No. 61206-3052/2-23, gave consent to the Decision of the Teaching and Scientific Council of the School of Electric Engineering on accepting the topic of the doctoral dissertation of Filip Bečanović titled "Uncovering optimal strategies in human motion using inverse optimal control" and on appointing Prof. Dr. Kosta Jovanović, Associate Professor at the University of Belgrade – School of Electric Engineering, and Prof. Dr. Samer Mohammed, Full Professor at the University Paris-Est Créteil, as supervisors.

The Candidate submitted the completed doctoral dissertation for review and evaluation on October 2, 2023.

The Committee for Third Degree Studies of the the School of Electric Engineering, University of Belgrade, at its session held on October 31, 2023, confirmed the fulfillment of the necessary conditions for submitting the proposal to the Teaching and Scientific Council for the formation of the Committee for the review and evaluation of the doctoral dissertation.

The Teaching and Scientific Council of the School of Electric Engineering in Belgrade, at its 891st session held on November 7, 2023, by decision No. 1630-17, appointed the Committee for the review and evaluation of the doctoral dissertation consisting of:

1. Dr. Željko Durović, Full Professor at the University of Belgrade - School of Electric Engineering;
2. Dr. Milica Janković, Associate Professor at the University of Belgrade - School of Electric Engineering;
3. Dr. François Charpillet, Research Advisor at the National Institute for Research in Digital Science and Technology INRIA Nancy, France;
4. Dr. Vincent Padois, Research Advisor at the National Institute for Research in Digital Science and Technology INRIA Bordeaux, France.

## 1.2. Scientific field of the dissertation

The doctoral dissertation falls under the scientific field of Electrical Engineering and Computing, primarily associated with the School of Electric Engineering of the University of Belgrade and the Université Paris-Est Créteil. It specifically belongs to the narrower field of automatic control. The main focus of the dissertation was the applications of modern automatic control methods based on data, collectively termed "inverse optimal control," for analyzing human coordination at the limb and muscle levels during movement.

The first supervisor of the doctoral dissertation, Dr. Kosta Jovanović, was appointed as an associate professor for the narrower scientific field of Automatic Control at the Electrical Engineering Faculty of the University of Belgrade. The supervisor has many years of research and teaching experience in the domain of automation, robotics, and biomechanics.

The second supervisor of the doctoral dissertation, Dr. Samer Mohammed, was appointed as a full professor at the Université Paris-Est Créteil. The supervisor has extensive research experience in the field of automation, wearable robots, and rehabilitation.

## 1.3. Biographical information about the candidate

Filip Bečanović, a master of engineering in electrical engineering and computing, was born on December 4, 1997, in Belgrade. He partially attended primary school in Belgrade at the "20. Oktobar" school and completed it in Paris, France, at Collège Janson de Sailly. He started high school in Paris at the Lycée of the same name and finished at the Ninth Belgrade Gymnasium Mihailo Petrović Alas. He enrolled in undergraduate academic studies at the Electrical Engineering Faculty in Belgrade in 2015. He graduated from the Signals and Systems department in 2019 with an average grade of 9.42, defending his thesis titled "Localization of robots in a known environment using a particle filter." He enrolled in master's academic studies at the Electrical Engineering Faculty in Belgrade in 2019 and completed them in 2020 with an average grade of 9.33, defending his master's thesis "Analysis of human motion using inverse optimal control."

During his undergraduate studies, he did an internship at the Microsoft Development Center in Belgrade for four months. During his master's studies, he did a research internship in Paris at the Laboratory of Images, Signals, and Intelligent Systems - LISSI (Laboratoire des Images Signaux et Systèmes Intelligents) at the Université Paris-Est Créteil for six months as part of the Erasmus+ student exchange program.

He enrolled in a dual doctoral academic program in 2020 at the School of Electrical Engineering of the University of Belgrade and at the Université Paris-Est Créteil. His research area includes the application of optimization algorithms for planning movements in humanoid mechanical structures and the use of inverse optimal control as a method for learning movements from examples. Since January 2021, he has been engaged as a research trainee at the Electrical Engineering Faculty in Belgrade. During his doctoral studies, he had two five-month research stays in Toulouse, France, with the humanoid robots research team Gepetto at the Laboratory for Analysis and Architecture of Systems (LAAS-CNRS) during 2022 and 2023.

## **2. DISSERTATION DESCRIPTION**

### 2.1. Dissertation contents

The doctoral dissertation titled "Uncovering optimal strategies in human motion using inverse optimal control" is composed of 112 pages written in English, in accordance with the Agreement on Bilateral Doctoral Studies.

It fully complies with the University of Belgrade's guidelines for the formatting of doctoral dissertations in terms of form and structure.

The dissertation contains the following elements:

- Front page in the English language;
- Front page in the Serbian language;
- Front page in the French language;
- A page with information about the supervisors and committee members;
- Acknowledgments;
- Page with the abstract and the details about the dissertation in English;
- Page with the abstract and the details about the dissertation in Serbian;
- Page with the abstract and the details about the dissertation in French;
- Table of Contents;
- The text of the dissertation by chapters:
  - o Introduction;
  - o Inverse Optimal Control;
  - o Bounding Errors using Polynomial Optimization;
  - o Force Sharing During Gait;
  - o Box-lifting;
  - o Conclusions and Future Works;
- List of Acronyms;
- List of Figures;
- List of Tables;
- List of Algorithms;
- Bibliography;
- Text of Appendix A.

The dissertation contains 26 figures, 10 tables, and a bibliography list with 150 bibliographic entries.

### 2.2. Brief overview of individual chapters

The first chapter highlights the subject of this dissertation, which examines the use of inverse optimal control techniques for identifying optimization models of human movement. It emphasizes the key ideas and motivation for working on this topic. The chapter discusses the need and significance of a better understanding of human motor control to advance in the field of robotic automation and the development of more efficient health and rehabilitation technologies. It also presents a review of research in the field of optimization modeling of human movements that supports this research, as well as the main hypotheses on which the current research is based. Additionally, part of the chapter provides insight into the structure and content of the rest of the dissertation.

The second chapter covers a review of the application of inverse optimal control in the analysis of human movements, focusing on its development and diverse methodologies, emphasizing the method of bilevel optimization and the inverse Karush-Kuhn-Tucker method. This chapter thoroughly discusses inverse optimal control, creating a theoretical basis for understanding its complex collective

and nonlinear regression nature. Key concepts such as Karush-Kuhn-Tucker conditions and model-data consistency are introduced, simultaneously highlighting the method of bilevel optimization as the preferred approach for future research and application in this domain.

The third chapter presents a contribution of inverse optimal control to quadratic programming models. It describes a new methodology for calculating error lower bounds in inverse optimal control, serving as a basis for a new process of selecting basic optimization functions. In this chapter, basis optimization functions and analytical properties of global optimum sets in quadratic programming models are analyzed in detail, both in unrestricted and restricted conditions. Algorithms for determining error lower bounds in inverse optimal control based on semidefinite programming are also introduced. This work not only improves understanding of inverse optimal control in quadratic programming models but also opens paths for future research, especially in methods of selecting basis optimization functions. It forms the foundation for future methods based on relaxations of bilevel inverse optimal control problems.

The fourth chapter deals with the application of inverse optimal control for modeling muscle force distribution during walking, an important problem in biomechanics and rehabilitation research. Using publicly available data on measured muscle forces in the lower limbs of humans during walking, the bilevel method of inverse optimal control is used to identify an optimization model that precisely predicts muscle force during walking and later estimates joint stiffness. The advantages of the bilevel method of inverse optimal control over the inverse Karush-Kuhn-Tucker method are highlighted based on comparison of the predictions of identified models of both types. This chapter also points out the limitations of the identified model for predicting muscle force, especially in terms of underestimating co-contractions, indicating the need for more comprehensive basis optimization functions. In addition, insights into the tendency of the central nervous system to minimize muscle activations and muscle strength are revealed, implying a significant proprioceptive component in muscle control since both quantities depend on the current state of the muscles.

The fifth chapter deals in detail with predicting joint trajectories of humans during the task of lifting a box, an important task in ergonomics research and workplace design. This chapter thoroughly reviews approaches to prediction based on optimization models, presenting key optimization constraints and optimization objectives used in such movement models. A biomechanical model in the sagittal plane with six degrees of freedom is used to describe the configuration of the human body, trajectories are reconstructed, and dynamic model parameters are identified based on data obtained from experiments with a motion capture system and a force plate. For identifying the optimization model that most accurately reproduces human-like behavior, bilevel inverse optimal control is implemented. The optimization model is identified using only one measured trajectory; however, there are different levels of accuracy in predicting joint trajectories across the data set. The results thus indicate the need for more descriptive optimization functions to increase the accuracy of predicting lifting movements.

The last chapter is the conclusion. It suggests the use of the bilevel method of inverse optimal control rather than the inverse Karush-Kuhn-Tucker method, citing its superiority in working with measurement noise and model uncertainties. Although the research shows the ability of inverse optimal control to capture certain patterns of human movements, it also points out significant shortcomings, such as the need for more efficient methods of selecting basis optimization functions and researching the properties of global and local optima in biomechanical models. The chapter emphasizes the computational complexity of the bilevel inverse optimal control as the main limitation, pointing to the need for progress in solving methods and software development.

Appendix A shows an example of the discretization of the state space in the form of an n-dimensional simplex and provides an algorithm that generates a uniform distribution of points on the said simplex.

### **3. EVALUATION OF THE DISSERTATION**

#### 3.1. Modernity and originality

The study of inverse optimal control is a significant research direction in the fields of robotics and biomechanics, reflecting a contemporary blend of combining artificial intelligence with practical applications. This approach essentially inverts the traditional paradigm of optimal control, striving to discern the underlying objective function that the system tries to optimize based on observed behavior. This is particularly important in robotics, where understanding and replicating human-like decision-making and movements are key to creating more adaptable, efficient, and intuitive robots. In addition to its key role in robotics, inverse optimal control finds critical application in various domains such as autonomous vehicle navigation, where it helps in understanding and mimicking human driving, and in economics and social sciences for modeling and predicting human decision-making processes in complex scenarios.

The contemporaneity of this subject lies in its interdisciplinary nature, mixing concepts from control theory, machine learning, and cognitive science. As robotic systems become more complex and autonomous, inverse optimal control provides a framework for these systems to learn from human behavior, thereby improving their performance and interaction capabilities. The study of inverse optimal control reflects a broader trend in the academic community towards research that not only pushes the boundaries of theoretical understanding but also has immediate, tangible applications in improving interactions between humans and technology.

Understanding individual human movements at the biomechanical level is of paramount importance, especially for advancements in the field of robotics. Each movement encompasses a complex orchestration of neural, muscular, and skeletal interactions, offering insights into the subtleties of human motion. Understanding these phenomena is key to developing robots capable of performing tasks with a level of dexterity and fluidity similar to humans. Accordingly, insights into leg movements aid in creating more agile and stable bipedal robots. At the whole-body level, this knowledge is crucial for developing humanoid robots capable of moving in various environments and assisting in tasks ranging from elderly care to operating in natural disaster environments. This focus on mimicking human movement planning is not just physical replication; it's about imbuing robots with the ability to predict, adapt, and react in fundamentally human ways.

The originality of the dissertation is reflected in the study of contemporary methods of inverse optimal control in the study and their use in the context of human biomechanics, as well as in the contribution it thereby provides. The originality is demonstrated in the newly developed method of finding the lower bound of error during inverse optimal control for quadratic programming models using semidefinite programming. It is also reflected in the comparative analysis of the bilevel method and the inverse Karush-Kuhn-Tucker method, two popular methods in the literature. The use of inverse optimal control on the task of muscle force distribution also represents a significant novelty, as inverse optimal control has not been used for analyses at the muscle level. The original contribution is also the application of inverse optimal control in identifying the optimization model for generating box-lifting movements.

#### 3.2. Review of references and used literature

The doctoral dissertation lists 150 relevant bibliographic references. The Candidate has studied literature in the field of optimization modeling of human movements both from a general point of view and from the point of view of individually studied problems of muscle force distribution during walking and the problem of generating box-lifting movements. The Candidate has also shown

knowledge of the literature in the field of inverse optimal control, chronologically following the development of various methods in this area. The Candidate for the doctoral dissertation has presented a wide range of literature, including significant publications in prestigious international journals and documents from important conferences, covering from basic theoretical setups to the latest research in the field. Reviewing his thesis and analyzing the used literature, it is evident that his original scientific contributions are effectively integrated into the existing scientific context, thus showing the true depth and breadth of his research work.

### 3.3. Description and adequacy of applied scientific methods

Adequate engineering and scientific methods (based on relevant literature) related to optimization theory and biomechanical modeling have been used in the doctoral dissertation. Numerous methods have been employed:

- elements of optimization theory such as the Karush-Kuhn-Tucker conditions, convex optimization, quadratic programming, nonlinear programming, semidefinite programming, multivariable optimization, and bilevel optimization;
- simplification of bilevel optimization to one-level in convex quadratic programming problems using Karush-Kuhn-Tucker conditions;
- use of the assumption of strict convexity in quadratic programming problems to prove analytical properties of the parametric set of its minima;
- implementation of the bilevel method and inverse Karush-Kuhn-Tucker method for inverse optimization of quadratic programming models;
- implementation of a method for finding the lower boundary of the process of inverse optimal control in quadratic programming models by solving semidefinite programs;
- implementation of an optimization model for the distribution of muscle forces with multiple biomechanical optimization functions;
- implementation of the two-level method and inverse Karush-Kuhn-Tucker method for inverse optimization and their application to modern measurements of muscle forces during walking to identify biomechanical optima that humans tend to achieve;
- experiment design and measurement of human movements using a typical biomechanical setup of a motion capture system and force measuring platform;
- kinematic and dynamic identification of a human body model based on data collected using a motion capture system and force measuring platform using a nonlinear least squares technique;
- modeling of joint trajectories using spline functions and generating box-lifting movement trajectories by optimizing different optimization functions;
- implementation of a bilevel optimization that finds a complex weighted optimization function that best describes measured human movement during box lifting.

The Candidate demonstrated a high level of ability in mathematical modeling of phenomena related to the study of human movement and a solid mastery of concepts from optimization theory. Moreover, the Candidate demonstrated the ability to engineer and implement software solutions relying on modern optimization software of various natures such as software for quadratic programming, nonlinear programming, or semidefinite programming.

### 3.4. Applicability of the obtained results

This doctoral dissertation is based on the idea that the use of certain measured human movements can improve biomechanical optimization models for predicting that movement, and inverse optimal control is chosen as a set of modern tools for achieving this goal.

From the dissertation emerged a method of finding the lower error boundary in the process of inverse optimal control in quadratic programming models using semidefinite programming. Also, from the dissertation emerged an identified optimization model for the distribution of muscle forces in the lower limbs during human walking, which can be used in exoskeletons and rehabilitation devices for predicting muscle forces and joint stiffness. The identified optimization model of human box-lifting movement can be applied for the simulation of human movement in ergonomic analyses of the work environment or for predicting human trajectory by robots in a shared environment.

### 3.5. Assessment of the candidate's achieved abilities for independent scientific work

During doctoral studies, the Candidate has shown abilities and traits that are key to independent scientific research work. He combined analytical research of professional literature with understanding and application of theoretical and practical concepts. He showed the ability to define scientific problems and approach their solution in a systematic manner. In addition, he demonstrated skill in developing simulation models and their implementation on a computer, as well as in the analysis and processing of the obtained results. Working on modeling human movements, the Candidate combined results from different fields such as biomechanics, optimization, and systems control. The results of the Candidate's work were successfully presented at an international conference and published in a scientific journal.

Accordingly, the Committee believes that the Candidate has reached a level of independence necessary for further scientific research work.

## **4. ACHIEVED SCIENTIFIC CONTRIBUTIONS**

### 4.1. Presentation of achieved scientific contributions

One of the contributions of this dissertation is the review of inverse optimal control as a technique for identifying and learning optimal control models for modeling human movements and tasks from human biomechanics.

The first large contribution of this dissertation is the method of finding the lower error boundary in the process of inverse optimal control in quadratic programming models using semidefinite programming. This result was presented at one of the leading international conferences in the field of automation, the IEEE Conference on Decision and Control 2022. (M33).

The main contribution of this dissertation is the identified optimization model for the distribution of muscle forces in the lower limbs during human walking, as well as a detailed analysis of its predictions on the available data set, both at the level of muscle forces and joint stiffness. The results of this research have been published in the highly prestigious international journal in the field of robotics, IEEE Robotics and Automation Letters 2023. (M22).

The last contribution of this dissertation is the identified optimization model of human box-lifting movement, which provides predictions of joint trajectories at the level of the entire body. The results of this research have not been published.

### 4.2. Critical analysis of research results

The topic of the dissertation is relevant and based on contemporary developments in the fields of modeling and analysis of human movements as well as inverse optimal control. The more significant contributions of this dissertation are grouped by chapters, and some individual contributions shine through the observation of multiple chapters.

The topic of basis objective function selection within inverse optimal control is relevant but rarely addressed. Through an approach based on the use of semidefinite programming for the relaxation of the bilevel problem of inverse optimal control with a quadratic model and the consequent finding of the lower error bounds of the inverse optimal control procedure, this dissertation presents an algorithm for selecting basis objective functions. Thus, the dissertation makes an original contribution to the field of inverse optimal control. The limitation of this approach is that it is defined only for quadratic models of direct optimal control; however, directions for the development and improvement of this methodology for wider classes of direct models are detailed.

Previous research in the field of inverse optimal control has not dealt with comparing the bilevel method and the inverse Karush-Kuhn-Tucker method except qualitatively by the amount of computing power necessary for the execution of each. In this regard, this dissertation is pragmatic and presents the results of both methods on several numerical examples as well as on a precisely defined practical problem of muscle force distribution. This analysis clearly shows the advantages of the bilevel method and advocates for its use rather than the use of the inverse Karush-Kuhn-Tucker method.

Of particular importance is the application of inverse optimal control for the analysis of human motor skills at the muscle level, which is among the first studies of this kind. The analysis of predictions of the identified model of muscle force distribution in the lower limbs during human walking shows that the identified model with a compound objective function gives better predictions than models with individual optimization functions. Also, the fact that the minimization of muscle activation and muscle power had the greatest weights in the direct model of muscle force distribution indicates a fundamental fact: that the central nervous system determines muscle forces based on knowledge of the current contractile state of those muscles.

The application of inverse optimal control for the analysis of box-lifting movement involving the whole body and containing complex optimization constraints such as bipedal stability and collision avoidance represents originality compared to previous research. The dissertation contains a complete biomechanical-engineering approach, starting from the data collection process and continuing with their detailed processing, identification of the kinematic and dynamic model, optimization modeling of trajectories, as well as the implementation of bilevel inverse optimal control. Although methodological contributions in modeling the movement of box lifting are present, the accuracy of the model on individual trajectories from the data set is at best equivalent to contemporary models and does not surpass them. Accordingly, the Committee recommends further improvement of this study and publication of the results in a scientific journal.

#### 4.3. Verification of scientific contributions

The scientific contributions on which this dissertation is based have been published in the following works, which were presented in an international journal (1 paper) and in the proceedings of an international conference (1 paper):

Work published in an international journal of significant:

**F. Bečanović**, V. Bonnet, R. Dumas, K. Jovanović and S. Mohammed, "Force Sharing Problem During Gait Using Inverse Optimal Control," IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 8, no. 2, pp. 872-879, Feb. 2023, Impact Factor: 5.2, doi: 10.1109/LRA.2022.3217398. (**M22**).

Work published in the proceedings of an international:

**F. Bečanović**, J. Miller, V. Bonnet, K. Jovanović and S. Mohammed, "Assessing the Quality of a Set of Basis Functions for Inverse Optimal Control via Projection onto Global Minimizers," 2022 IEEE

61st Conference on Decision and Control (CDC), Cancun, Mexico, 2022, pp. 7598-7605, doi: 10.1109/CDC51059.2022.9993342. (M33).

## 5. CONCLUSION AND PROPOSAL

The Committee believes that the doctoral dissertation by Filip Bečanović, Master of Electrical Engineering and Computing, titled "Uncovering optimal strategies in human movement using inverse optimal control" meets all the essential and formal requirements set by the Law on Higher Education as well as regulations of the University of Belgrade and the School of Electric Engineering. Based on all the presented, the Committee proposes to the Teaching and Scientific Council of the School of Electric Engineering that the doctoral dissertation titled "Uncovering optimal strategies in human movement using inverse optimal control" by the Candidate Filip Bečanović be accepted, made available to the public for review, and submitted for final adoption to the Council of Scientific Fields of Technical Sciences of the University of Belgrade.

In Belgrade, November 22, 2023.

### COMMITTEE MEMBERS



Dr. Željko Đurović, Full Professor  
University of Belgrade - School of Electric Engineering



Dr. Milica Janković, Associate Professor  
University of Belgrade - School of Electric Engineering



Dr. François Charpillet, Research Director  
INRIA Nancy, France



Dr. Vincent Padois, Research Director  
INRIA Bordeaux, France

## AU CONSEIL D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE

**Sujet :** Rapport sur la thèse de doctorat réalisée par le candidat Filip Bečanović, ingénieur maître en électrotechnique et informatique

Par la décision du Conseil d'enseignement et de recherche de l'École Électrotechnique de l'Université de Belgrade n° 1630-17 du 07.11.2023, nous avons été nommés membres du Comité pour l'examen, l'évaluation et la soutenance de la thèse de doctorat du candidat Filip Bečanović intitulée :

### **Identification de stratégies optimales dans le mouvement humain via le contrôle optimal inverse**

avec le titre en anglais qui est :

### **Uncovering optimal strategies in human motion using inverse optimal control**

Après avoir examiné la thèse soumise et les autres documents accompagnants et après discussion avec le Candidat, le Comité a rédigé le suivant :

## **R A P P O R T**

### **1. INTRODUCTION**

#### **1.1. Chronologie de l'approbation et de la rédaction de la thèse**

Filip Bečanović s'est inscrit en études doctorales académiques en Génie Électrique, module Contrôle de Systèmes et Traitement du Signal, à l'École Électrotechnique de l'Université de Belgrade le 2 novembre 2020. Il a réussi tous les examens avec la meilleure note et a rempli toutes les obligations liées au travail de recherche conformément au plan et au programme, acquérant ainsi le droit de soumettre sa thèse doctorale pour examen et évaluation.

Le candidat a déclaré le sujet de sa thèse doctorale le 1er juin 2023, intitulée "Identification de stratégies optimales dans le mouvement humain via le contrôle optimal inverse".

Le Comité pour les Études de Troisième Cycle le 6 juin 2023 a examiné le sujet proposé pour la thèse doctorale et a adressé une proposition au Conseil d'Enseignement et Scientifique pour la nomination du Comité d'évaluation de la base scientifique du sujet de la thèse doctorale.

Le Conseil d'Enseignement et Scientifique de l'École Électrotechnique à Belgrade lors de sa 887ème session tenue le 13 juin 2023 par la décision No. 883-34 a nommé le Comité d'évaluation de la base scientifique du sujet de la thèse doctorale composée de :

1. Dr. Milica Janković, Professeur associé à l'Université de Belgrade - École Électrotechnique ;
2. Dr. Dragan Mirkov, Professeur à l'Université de Belgrade - Faculté de Sports et Éducation Physique ;

3. Dr. Nenad Jovičić, Professeur associé à l'Université de Belgrade - École Électrotechnique ;
4. Dr. Maja Trumić, Chercheuse associée à l'Université de Belgrade - École Électrotechnique.

Pour les directeurs de la thèse doctorale, Dr. Kosta Jovanović, Professeur associé à l'Université de Belgrade – École Électrotechnique et Dr. Samer Mohammed, Professeur à l'Université Paris-Est Créteil ont été proposés, conformément au programme bilatéral d'études doctorales entre l'Université de Belgrade – École Électrotechnique et l'Université Paris-Est Créteil à Paris, France.

La soutenance publique du sujet de la thèse doctorale par le candidat s'est tenue à l'École Électrotechnique à Belgrade le 20 juin 2023 devant le comité dans la composition précédemment mentionnée. Le Comité a unanimement conclu que le candidat Filip Bečanović a satisfait aux exigences lors de la soutenance publique du sujet proposé. Avec les directeurs proposés de la thèse doctorale, le comité a soumis un Rapport pour l'évaluation de la base scientifique du sujet de la thèse doctorale.

Le Conseil d'Enseignement et Scientifique de l'École Électrotechnique à Belgrade lors de sa 888ème session tenue le 4 juillet 2023 par la décision No. 997-17 a adopté le Rapport du Comité pour l'évaluation de la base scientifique du sujet de la thèse doctorale.

Le Conseil des Domaines Scientifiques des Sciences Techniques à l'Université de Belgrade lors de sa session tenue le 11 septembre 2023 par la décision No. 61206-3052/2-23 a donné son consentement à la Décision du Conseil d'Enseignement et Scientifique de l'École Électrotechnique concernant l'acceptation du sujet de la thèse doctorale de Filip Bečanović intitulé "Identification de stratégies optimales dans le mouvement humain via le contrôle optimal inverse" et concernant la nomination de Prof. Dr. Kosta Jovanović, Professeur associé à l'Université de Belgrade – École Électrotechnique, et du Prof. Dr. Samer Mohammed, Professeur à l'Université Paris-Est Créteil, comme directeurs de la thèse doctorale de Filip Bečanović.

Le candidat a ensuite préparé et soumis sa thèse doctorale pour évaluation, le 2 octobre 2023.

Le Comité pour les Études de Troisième Cycle, lors de sa session tenue le 31 octobre 2023, a confirmé le respect des conditions nécessaires pour soumettre la proposition au Conseil d'Enseignement et Scientifique en vue de la formation du Comité pour la révision et l'évaluation de la thèse doctorale.

Le Conseil d'Enseignement et Scientifique de l'École Électrotechnique de Belgrade, lors de sa 891ème session tenue le 7 novembre 2023, par la décision No. 1630-17, a nommé le Comité pour l'examen, l'évaluation et la soutenance de la thèse doctorale composé de :

1. Dr. Željko Đurović, Professeur à l'Université de Belgrade - École Électrotechnique ;
2. Dr. Milica Janković, Professeur associé à l'Université de Belgrade - École Électrotechnique ;
3. Dr. François Charpillet, Directeur de Recherche à l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies Numériques INRIA Nancy, France ;
4. Dr. Vincent Padois, Directeur de Recherche à l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies Numériques INRIA Bordeaux, France.

## 1.2. Domaine scientifique de la thèse

La thèse doctorale relève du domaine scientifique de l'Ingénierie Électrique et de l'Informatique, principalement associé à l'École Électrotechnique de l'Université de Belgrade et à l'Université Paris-Est Créteil. Elle appartient plus spécifiquement au champ plus restreint de l'automatique. L'accent principal de la thèse portait sur les applications des méthodes modernes d'automatique basées sur les données, collectivement appelées "contrôle optimal inverse", pour analyser la coordination humaine au niveau des membres et des muscles pendant le mouvement.

Le premier directeur de la thèse doctorale, Dr. Kosta Jovanović, a été nommé en tant que professeur associé pour le domaine scientifique de l'Automatique à l'École Électrotechnique de l'Université de Belgrade. Le directeur de thèse possède de nombreuses années d'expérience en recherche et en enseignement dans le domaine de l'automatique, de la robotique et de la biomécanique.

Le second directeur de la thèse doctorale, le Dr. Samer Mohammed, a été nommé en tant que professeur à l'Université Paris-Est Créteil. Le directeur possède une vaste expérience de recherche dans le domaine de l'automatique, des robots portables et de la réadaptation.

### 1.3. Informations biographiques sur le candidat

Filip Bečanović, maître en génie électrique et informatique, est né le 4 décembre 1997 à Belgrade. Il a partiellement suivi ses études primaires à Belgrade à l'école "20. Oktobar" et les a terminées à Paris, France, au Collège Janson de Sailly. Il a commencé ses études secondaires à Paris au Lycée du même nom et les a terminées à la Neuvième Gymnase de Belgrade Mihailo Petrović Alas. Il s'est inscrit aux études universitaires de premier cycle à l'École Électrotechnique de Belgrade en 2015. Il a obtenu son diplôme au département des Signaux et Systèmes en 2019 avec une moyenne de 9,42 sur 10, en défendant sa thèse intitulée "Localisation des robots dans un environnement connu en utilisant un filtre à particules". Il s'est inscrit aux études universitaires de maîtrise à l'École Électrotechnique de Belgrade en 2019 et les a terminées en 2020 avec une moyenne de 9,33 sur 10, en défendant sa thèse de maîtrise "Analyse du mouvement humain en utilisant le contrôle optimal inverse".

Durant ses études de premier cycle, il a effectué un stage de quatre mois au Microsoft Development Center de Belgrade. Durant ses études, il a effectué un stage de recherche de six mois à Paris au Laboratoire des Images, Signaux et Systèmes Intelligents - LISSI (Laboratoire des Images Signaux et Systèmes Intelligents) à l'Université Paris-Est Créteil dans le cadre du programme d'échange étudiant Erasmus+.

Il s'est inscrit en 2020 à un programme doctoral double diplôme à l'École Électrotechnique de Belgrade et à l'Université Paris-Est Créteil. Son domaine de recherche comprend l'application d'algorithmes d'optimisation pour la planification des mouvements dans les structures mécaniques humanoïdes et l'utilisation du contrôle optimal inverse comme méthode pour apprendre des mouvements à partir d'exemples. Depuis janvier 2021, il est engagé en tant que stagiaire de recherche à l'École Électrotechnique de Belgrade. Durant ses études doctorales, il a effectué deux séjours de recherche de cinq mois à Toulouse, France, avec l'équipe de recherche sur les robots humanoïdes Gepetto au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS-CNRS) en 2022 et 2023.

## **2. DESCRIPTION DE LA THÈSE**

### 2.1. Contenu de la thèse

La thèse doctorale intitulée "Identification de stratégies optimales dans le mouvement humain via le contrôle optimal inverse" se compose de 112 pages rédigées en anglais conformément à l'Accord sur les Études Doctorales Bilatérales. Elle respecte pleinement les directives de l'Université de Belgrade concernant la mise en forme des thèses doctorales en termes de forme et de structure.

La thèse contient les éléments suivants :

- Page de couverture en anglais ;
- Page de couverture en serbe ;
- Page de couverture en français ;

- Une page avec des informations sur les directeurs et les membres du comité ;
- Remerciements ;
- Page avec le résumé et les détails sur la thèse en anglais ;
- Page avec le résumé et les détails sur la thèse en serbe ;
- Page avec le résumé et les détails sur la thèse en français ;
- Table des matières ;
- Le texte de la thèse par chapitres :
  - o Introduction ;
  - o Contrôle Optimal Inverse ;
  - o Limitation des Erreurs en utilisant l'Optimisation Polynomiale ;
  - o Partage des Forces pendant la Marche ;
  - o Levée de Boîte ;
  - o Conclusions et Travaux Futurs ;
- Liste des Acronymes ;
- Liste des Figures ;
- Liste des Tableaux ;
- Liste des Algorithmes ;
- Bibliographie ;
- Texte de l'Annexe A.

La thèse contient 26 figures, 10 tableaux et une liste bibliographique avec 150 entrées bibliographiques.

## 2.2. Bref aperçu des chapitres individuels

Le premier chapitre souligne le sujet de cette thèse qui examine l'utilisation des techniques de contrôle optimal inverse pour identifier les modèles d'optimisation du mouvement humain. Il met en évidence les idées clés et la motivation pour travailler sur ce sujet. Le chapitre discute de la nécessité et de l'importance d'une meilleure compréhension du contrôle moteur humain pour progresser dans le domaine de l'automatisation robotique et le développement de technologies de santé et de réadaptation plus efficaces. Il présente également une revue des recherches dans le domaine de la modélisation d'optimisation des mouvements humains qui soutient cette recherche ainsi que les principales hypothèses sur lesquelles repose la recherche actuelle. En outre, une partie du chapitre donne un aperçu de la structure et du contenu du reste de la thèse.

Le deuxième chapitre couvre une revue de l'application du contrôle optimal inverse dans l'analyse des mouvements humains, en se concentrant sur son développement et diverses méthodologies, en mettant l'accent sur la méthode d'optimisation à deux niveaux et la méthode inverse de Karush-Kuhn-Tucker. Ce chapitre discute en profondeur du contrôle optimal inverse, créant une base théorique pour comprendre sa nature collective complexe et non linéaire de régression. Des concepts clés tels que les conditions de Karush-Kuhn-Tucker et l'alignement modèle-données sont introduits, soulignant simultanément la méthode d'optimisation à deux niveaux comme l'approche privilégiée pour la recherche future et l'application dans ce domaine.

Le troisième chapitre présente une contribution du contrôle optimal inverse aux modèles de programmation quadratique. Il décrit une nouvelle méthodologie pour calculer des bornes inférieures d'erreur dans le contrôle optimal inverse, servant de base à un nouveau processus de sélection des fonctions d'optimisation de base. Dans ce chapitre, les fonctions d'optimisation de base et les propriétés analytiques des ensembles d'optimum global dans les modèles de programmation quadratique sont analysées en détail, à la fois dans des conditions non restreintes et restreintes. Des algorithmes pour déterminer les bornes inférieures d'erreur dans le contrôle optimal inverse basés sur

la programmation semi-définie sont également introduits. Ce travail améliore non seulement la compréhension du contrôle optimal inverse dans les modèles de programmation quadratique, mais ouvre également des voies pour des recherches futures, en particulier dans les méthodes de sélection des fonctions d'optimisation de base. Il forme la base pour des méthodes futures basées sur des relaxations de problèmes de contrôle optimal inverse à deux niveaux.

Le quatrième chapitre traite de l'application du contrôle optimal inverse pour modéliser la distribution des forces musculaires pendant la marche, un problème important dans la recherche en biomécanique et en réadaptation. En utilisant des données publiques sur les forces musculaires mesurées dans les membres inférieurs des humains pendant la marche, la méthode à deux niveaux de contrôle optimal inverse identifie un modèle d'optimisation qui prédit précisément la force musculaire pendant la marche et estime ensuite la rigidité articulaire. Les avantages de la méthode à deux niveaux de contrôle optimal inverse par rapport à la méthode inverse de Karush-Kuhn-Tucker sont mis en évidence sur la base d'une analyse approfondie et d'une comparaison des prédictions des modèles identifiés des deux types. Ce chapitre souligne également les limites du modèle identifié pour prédire la force musculaire, en particulier en termes de sous-estimation des co-contractions, indiquant le besoin de fonctions d'optimisation de base plus complètes. En outre, des informations sur la tendance du système nerveux central à minimiser les activations musculaires et la force musculaire sont révélées, impliquant une composante proprioceptive significative dans le contrôle musculaire puisque les deux quantités dépendent de l'état contractile actuel des muscles.

Le cinquième chapitre traite en détail de la prédiction des trajectoires articulaires chez les humains lors de la tâche de soulever une boîte, une tâche importante dans la recherche en ergonomie et la conception des lieux de travail. Ce chapitre passe en revue de manière approfondie les approches de prédiction basées sur des modèles d'optimisation, présentant les principales contraintes d'optimisation et les fonctions d'optimisation utilisées dans de tels modèles de mouvement. Un modèle biomécanique dans le plan sagittal avec six degrés de liberté est utilisé pour décrire la configuration du corps humain, les trajectoires sont reconstruites, et les paramètres du modèle dynamique sont identifiés sur la base de données obtenues à partir d'un système de capture de mouvement et d'une plateforme de force. Pour identifier le modèle d'optimisation qui reproduit le plus fidèlement le comportement humain, le contrôle optimal inverse à deux niveaux est utilisé. Le modèle d'optimisation est identifié en utilisant une seule trajectoire mesurée ; cependant, il existe différents niveaux de précision dans la prédiction des trajectoires articulaires à travers la base de données. Les résultats indiquent donc la nécessité de fonctions d'optimisation plus complexes et descriptives pour augmenter la précision de la prédiction des mouvements de levage.

Le dernier chapitre est la conclusion. Il suggère l'utilisation de la méthode à deux niveaux de contrôle optimal inverse avant la méthode inverse de Karush-Kuhn-Tucker, citant sa supériorité dans le travail avec le bruit de mesure et les incertitudes du modèle. Bien que la recherche montre la capacité du contrôle optimal inverse à capturer certaines régularités des mouvements humains, elle souligne également d'importants défauts, tels que la nécessité de méthodes plus efficaces de sélection des fonctions d'optimisation de base et de la recherche sur les propriétés des optima globaux dans les modèles biomécaniques. Le chapitre met l'accent sur la complexité de calcul du contrôle optimal inverse à deux niveaux comme principale limitation, soulignant la nécessité de progrès dans les méthodes de résolution et le développement de logiciels.

L'annexe A présente un exemple de discrétisation de l'espace d'état sous la forme d'un simplexe n-dimensionnel et fournit un algorithme qui génère une distribution uniforme de points sur le simplexe.

### **3. ÉVALUATION DE LA THÈSE**

#### 3.1. Modernité et Originalité

L'étude du contrôle optimal inverse représente une direction significative dans les domaines de la robotique et de la biomécanique, reflétant une combinaison contemporaine de l'intelligence artificielle avec des applications pratiques. Cette approche inverse essentiellement le paradigme traditionnel du contrôle optimal, cherchant à discerner la fonction d'optimisation sous-jacente que le système essaie d'optimiser sur la base du comportement observé. Cela est particulièrement important en robotique, où comprendre et reproduire la prise de décision et les mouvements humains sont clés pour créer des robots plus adaptables, efficaces et intuitifs. En plus de son rôle clé en robotique, le contrôle optimal inverse trouve une application critique dans divers domaines tels que la navigation des véhicules autonomes, où il aide à comprendre et à imiter la conduite humaine, et en économie et sciences sociales pour modéliser et prédire les processus de prise de décision humaine dans des scénarios complexes.

L'actualité de ce domaine réside dans sa nature interdisciplinaire, mélangeant des concepts de la théorie du contrôle, de l'apprentissage automatique et des sciences cognitives. Alors que les systèmes robotiques deviennent plus complexes et autonomes, le contrôle optimal inverse fournit un cadre pour que ces systèmes apprennent du comportement humain, améliorant ainsi leurs performances et leurs capacités d'interaction. L'étude du contrôle optimal inverse reflète une tendance plus large dans la communauté universitaire vers des recherches qui non seulement repoussent les frontières de la compréhension théorique, mais ont également des applications tangibles immédiates dans l'amélioration des interactions entre les humains et la technologie.

Comprendre les mouvements humains individuels au niveau biomécanique est d'une importance capitale, notamment pour les avancées dans le domaine de la robotique. Chaque mouvement englobe une orchestration complexe d'interactions neuronales, musculaires et squelettiques, offrant des aperçus sur les subtilités du mouvement humain. Comprendre ces phénomènes est clé pour développer des robots capables d'effectuer des tâches avec un niveau de dextérité et de fluidité similaires à ceux des humains. En conséquence, des aperçus sur les mouvements des jambes aident à créer des robots bipèdes plus agiles et stables. Au niveau du corps entier, cette connaissance est cruciale pour développer des robots humanoïdes capables de se déplacer dans divers environnements et d'aider dans des tâches allant des soins aux personnes âgées à l'opération dans des environnements de catastrophe naturelle. Cette focalisation sur l'imitation de la planification du mouvement humain ne se limite pas à la réplication physique ; il s'agit d'insuffler aux robots la capacité de prédire, de s'adapter et de réagir de manière fondamentalement humaine.

L'originalité de la thèse se reflète dans l'étude des méthodes contemporaines de contrôle optimal inverse et dans l'étude et leur utilisation dans le contexte de la biomécanique humaine, ainsi que dans la contribution qu'elle apporte ainsi. L'originalité est démontrée dans la méthode nouvellement développée pour trouver la borne inférieure de l'erreur du contrôle optimal inverse pour les modèles de programmation quadratique en utilisant la programmation semi-définie. Elle se reflète également dans l'analyse comparative de la méthode à deux niveaux et de la méthode inverse de Karush-Kuhn-Tucker, deux méthodes populaires dans la littérature. L'utilisation du contrôle optimal inverse sur la tâche de distribution de la force musculaire représente également une nouveauté significative, car le contrôle optimal inverse n'a pas été utilisé pour des analyses au niveau musculaire. Une contribution originale est également l'application du contrôle optimal inverse dans l'identification du modèle d'optimisation pour générer des mouvements de levage de boîte.

### 3.2. Revue de la littérature de référence et utilisée

La thèse doctorale répertorie 150 références bibliographiques pertinentes. Le candidat a étudié la littérature dans le domaine de la modélisation d'optimisation des mouvements humains, à la fois d'un point de vue général et du point de vue des problèmes individuellement étudiés de distribution de la force musculaire pendant la marche et du problème de génération de mouvements de levage de boîte. Le candidat a également montré sa connaissance de la littérature dans le domaine du contrôle optimal inverse, suivant chronologiquement le développement de diverses méthodes dans ce domaine. Le candidat pour la thèse doctorale a présenté une large gamme de littérature, incluant des publications significatives dans des revues internationales prestigieuses et des documents issus de conférences importantes, couvrant des configurations théoriques de base aux recherches les plus récentes dans le domaine. En examinant sa thèse et en analysant la littérature utilisée, il est évident que ses contributions scientifiques originales sont efficacement intégrées dans le contexte scientifique existant, montrant ainsi la véritable profondeur et étendue de son travail de recherche.

### 3.3. Description et adéquation des méthodes scientifiques appliquées

Des méthodes d'ingénierie et scientifiques adéquates (basées sur la littérature pertinente) liées à la théorie de l'optimisation et à la modélisation biomécanique ont été utilisées dans la thèse doctorale. De nombreuses méthodes ont été employées :

- éléments de la théorie de l'optimisation tels que les conditions de Karush-Kuhn-Tucker, l'optimisation convexe, la programmation quadratique, la programmation non linéaire, la programmation semi-définie, l'optimisation multivariable et l'optimisation à deux niveaux ;
- simplification de l'optimisation à deux niveaux en problèmes de programmation quadratique convexe à un seul niveau en utilisant les conditions de Karush-Kuhn-Tucker ;
- utilisation de l'hypothèse de stricte convexité dans les problèmes de programmation quadratique pour prouver les propriétés analytiques de l'ensemble paramétrique de ses minima ;
- mise en œuvre de la méthode à deux niveaux et de la méthode inverse de Karush-Kuhn-Tucker pour l'optimisation inverse des modèles de programmation quadratique ;
- mise en œuvre d'une méthode pour trouver la limite inférieure de l'erreur dans le processus de contrôle optimal inverse dans les modèles de programmation quadratique en résolvant des programmes semi-définis ;
- mise en œuvre d'un modèle d'optimisation pour la distribution des forces musculaires avec plusieurs fonctions d'optimisation biomécanique ;
- mise en œuvre des méthodes à deux niveaux et inverse de Karush-Kuhn-Tucker pour l'optimisation inverse et leur application aux mesures des forces musculaires pendant la marche pour identifier les optima biomécaniques que les humains tendent à atteindre ;
- identification cinématique et dynamique basée sur des données collectées à l'aide d'un système de capture de mouvement et d'une plateforme de mesure de force en utilisant une technique des moindres carrés non linéaires ;
- conception d'expérience et mesure des mouvements humains en utilisant une configuration biomécanique typique d'un système de capture de mouvement et d'une plateforme de mesure de force ;
- modélisation des trajectoires articulaires à l'aide de fonctions spline et génération de trajectoires de mouvement de levage de boîte en optimisant différentes fonctions d'optimisation ;
- mise en œuvre de l'optimisation à deux niveaux qui trouve une fonction d'optimisation pondérée complexe qui décrit au mieux le mouvement humain mesuré pendant le levage de boîte.

Le candidat a démontré un niveau élevé de capacité dans la modélisation mathématique des phénomènes liés à l'étude du mouvement humain et une solide maîtrise des concepts de la théorie de l'optimisation. De plus, le candidat a démontré une capacité à développer des solutions reposant sur des logiciels d'optimisation modernes de diverses natures tels que la programmation quadratique, la programmation non linéaire ou la programmation semi-définie.

### 3.4. Applicabilité des résultats obtenus

Cette thèse doctorale repose sur l'idée que l'utilisation de mesures de certains mouvements humains peut améliorer les modèles d'optimisation biomécanique pour prédire ce mouvement, et le contrôle optimal inverse est choisi comme un ensemble d'outils modernes pour atteindre cet objectif.

De la thèse a émergé une méthode de détermination de borne inférieure d'erreur dans le processus de contrôle optimal inverse pour les modèles de programmation quadratique en utilisant la programmation semi-définie. De plus, la thèse a permis d'identifier un modèle d'optimisation pour la distribution des forces musculaires dans les membres inférieurs lors de la marche humaine, qui peut être utilisé dans les exosquelettes et les dispositifs de réadaptation pour prédire les forces musculaires et la rigidité articulaire. Le modèle d'optimisation identifié du mouvement de levage de boîte humain peut être appliqué pour la simulation de mouvements humains dans les analyses ergonomiques de l'environnement de travail ou pour prédire la trajectoire humaine par des robots dans un environnement partagé.

### 3.5. Évaluation des capacités acquises du candidat pour un travail scientifique indépendant

Durant ses études doctorales, le candidat a démontré des aptitudes et des traits essentiels pour un travail de recherche scientifique indépendant. Il a combiné la recherche analytique de la littérature avec la compréhension et l'application de concepts théoriques et pratiques. Il a montré la capacité de définir des problèmes scientifiques et d'aborder leur solution de manière systématique. De plus, il a fait preuve d'habileté dans le développement de modèles de simulation et leur mise en œuvre sur ordinateur, ainsi que dans l'analyse et le traitement des résultats obtenus. Travaillant sur la modélisation des mouvements humains, le candidat a combiné des résultats de différents domaines tels que la biomécanique, l'optimisation et la gestion des systèmes. Les résultats du travail du candidat ont été présentés avec succès lors d'une conférence internationale et publiés dans une revue scientifique.

En conséquence, le Comité estime que le candidat a atteint le niveau d'indépendance nécessaire pour poursuivre des travaux de recherche scientifique.

## **4. CONTRIBUTION SCIENTIFIQUE OBTENUE**

### 4.1. Présentation des contributions scientifiques réalisées

L'une des contributions de cette thèse est la revue du contrôle optimal inverse en tant que technique pour identifier et apprendre des modèles de contrôle optimal pour la modélisation des mouvements et des tâches humaines en biomécanique.

La première grande contribution de cette thèse est la méthode de détermination de la borne inférieure d'erreur dans le processus de contrôle optimal inverse pour les modèles de programmation quadratique en utilisant la programmation semi-définie. Ce résultat a été présenté lors de l'une des principales conférences internationales dans le domaine de l'automatisation, la *IEEE Conference on Decision and Control 2022* (M33).

La principale contribution de cette thèse est le modèle d'optimisation identifié pour la distribution des forces musculaires dans les membres inférieurs lors de la marche humaine, ainsi qu'une analyse détaillée de ses prédictions sur l'ensemble de données disponible, tant au niveau des forces musculaires que de la rigidité articulaire. Les résultats de cette recherche ont été publiés dans la prestigieuse revue internationale dans le domaine de la robotique, *IEEE Robotics and Automation Letters* 2023 (M22).

La dernière contribution de cette thèse est le modèle d'optimisation identifié du mouvement de levage de boîte humain, qui fournit des prédictions de trajectoires articulaires au niveau du corps entier. Les résultats de cette recherche n'ont pas été publiés.

#### 4.2. Analyse critique des résultats de recherche

Le sujet de la thèse est actuel et basé sur les développements contemporains dans les domaines de la modélisation et de l'analyse des mouvements humains ainsi que du contrôle optimal inverse. Les contributions plus significatives de cette thèse sont regroupées par chapitres, et certaines contributions individuelles se distinguent à travers l'observation de plusieurs chapitres.

Le sujet de la sélection des fonctions d'optimisation de base dans le contrôle optimal inverse est actuel mais faiblement abordé. À travers une approche basée sur l'utilisation de la programmation semi-définie pour la relaxation du problème à deux niveaux de contrôle optimal inverse avec un modèle quadratique et la conséquente recherche de la limite inférieure d'erreur du processus de contrôle optimal inverse, cette thèse présente un algorithme pour la sélection des fonctions d'optimisation de base. Ainsi, la thèse apporte une contribution originale au domaine du contrôle optimal inverse. La limitation de cette approche est qu'elle est définie uniquement pour les modèles quadratiques de contrôle optimal direct ; cependant, des directions pour le développement et l'amélioration de cette méthodologie pour des classes plus larges de modèles directs sont détaillées.

Les recherches antérieures dans le domaine du contrôle optimal inverse n'ont pas traité de la comparaison de la méthode d'optimisation à deux niveaux et de la méthode inverse de Karush-Kuhn-Tucker, sauf qualitativement par la quantité de puissance de calcul nécessaire pour l'exécution des deux. À cet égard, cette thèse est pragmatique et présente les résultats des deux méthodes sur plusieurs exemples numériques ainsi que sur un problème pratique précisément défini de distribution des forces musculaires. Cette analyse montre clairement les avantages de la méthode à deux niveaux et plaide en faveur de son utilisation avant la méthode inverse de Karush-Kuhn-Tucker.

D'une importance particulière est l'application du contrôle optimal inverse pour l'analyse des compétences motrices humaines au niveau musculaire, qui se compte parmi les premières études de ce type. L'analyse des prédictions du modèle identifié de distribution des forces musculaires dans les membres inférieurs pendant la marche humaine montre que le modèle identifié avec une fonction d'optimisation complexe donne de meilleures prédictions que les modèles avec des fonctions d'optimisation individuelles. De plus, le fait que la minimisation de l'activation musculaire et de la puissance musculaire aient le plus grand poids dans le modèle direct de distribution de la force musculaire indique le fait fondamental que le système nerveux central détermine les forces musculaires en fonction de la connaissance de l'état contractile actuel de ces muscles.

L'application du contrôle optimal inverse pour l'analyse du mouvement de levage de boîte impliquant tout le corps et contenant des contraintes d'optimisation complexes telles que la stabilité bipède et l'évitement des collisions représente une originalité par rapport aux recherches précédentes. La thèse contient une approche d'ingénierie biomécanique complète, allant du processus de collecte de données et leur traitement détaillé à l'identification du modèle cinématique et dynamique, la

modélisation d'optimisation des trajectoires ainsi que la mise en œuvre du contrôle optimal inverse à deux niveaux. Bien que des contributions méthodologiques dans la modélisation du mouvement de levage de boîte soient présentes, la précision du modèle sur des trajectoires individuelles de l'ensemble de données est au mieux équivalente aux modèles contemporains et ne les dépasse pas. En conséquence, le Comité suggère une amélioration ultérieure de cette étude et la publication des résultats dans une revue scientifique.

#### 4.3 Vérification des contributions scientifiques

Les contributions scientifiques sur lesquelles repose cette thèse ont été publiées dans les travaux suivants, qui ont été présentés dans un journal international (1 article) et dans les actes d'une conférence internationale (1 article) :

Travail publié dans un journal international d'importance :

**F. Bećanović**, V. Bonnet, R. Dumas, K. Jovanović and S. Mohammed, "Force Sharing Problem During Gait Using Inverse Optimal Control," IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 8, no. 2, pp. 872-879, Feb. 2023, Impact Factor: 5.2, doi: 10.1109/LRA.2022.3217398. (**M22**).

Travail publié dans les actes d'une conférence internationale :

**F. Bećanović**, J. Miller, V. Bonnet, K. Jovanović and S. Mohammed, "Assessing the Quality of a Set of Basis Functions for Inverse Optimal Control via Projection onto Global Minimizers," 2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC), Cancun, Mexico, 2022, pp. 7598-7605, doi: 10.1109/CDC51059.2022.9993342. (**M33**).

## 5. CONCLUSION ET PROPOSITION

Le Comité estime que la thèse doctorale de Filip Bećanović, maître en génie électrique et informatique, intitulée "Identification de stratégies optimales dans le mouvement humain via le contrôle optimal inverse", répond à toutes les exigences essentielles et formelles fixées par la loi sur l'enseignement supérieur, ainsi qu'aux réglementations de l'Université de Belgrade et de l'École Électrotechnique. Sur la base de tout ce qui a été présenté, le Comité propose au Conseil d'Enseignement et Scientifique de l'École Électrotechnique que la thèse doctorale intitulée "Identification de stratégies optimales dans le mouvement humain en utilisant le contrôle optimal inverse" du candidat Filip Bećanović soit acceptée, rendue disponible au public pour examen et soumise à adoption finale au Conseil des Domaines Scientifiques des Sciences Techniques de l'Université de Belgrade.

À Belgrade, le 22 novembre 2023.

### MEMBRES DU COMITÉ



Dr. Željko Đurović, Professeur  
Université de Belgrade - École Électrotechnique



Dr. Milica Janković, Professeur associé  
Université de Belgrade - École Électrotechnique



Dr. François Charpillet, Directeur de recherche  
INRIA Nancy, France



Dr. Vincent Padois, Directeur de recherche  
INRIA Bordeaux, France