

Р е ц е н з и я

по процедура за защита на дисертационен труд на тема:

Моделиране и управление на антропоморфен модел на робот

за придобиване на образователна и научна степен **Доктор**

кандидат: **Любомира Лъчезарова Митева,**

Област на висше образование: **4. Природни науки, математика и информатика**

Професионално направление: **4.6. Информатика и компютърни науки**

Докторска програма: „Информационни системи“ – Вградени и автономни системи, катедра **Компютърна информатика, Факултет по математика и информатика (ФМИ),**

Софийски университет „Св. Климент Охридски“ (СУ),

Рецензията е изготвена от: **Проф. д-р Васил Георгиев Цунижев, ФМИ-СУ**

в качеството ми на член на научното жури, съгласно Заповед № РД 38-114/06.03.2023 г. на Ректора на Софийския университет.

1. Обща характеристика на дисертационния труд и представените материали

Представената дисертация е озаглавена «Моделиране и управление на антропоморфен модел на робот» и има характера на монография с разгърнат справочен и самоописателен материал. Тя се състои от общо 132 стр. Уводът с четирите глави, допълнени от Заключение и Перспективи за развитие както и библиографската справка заемат 118 стр. Останалото съдържание представлява справки относно приносите, както и публикационната и проектна активност на дисертанта.

Работата е структурирана правилно, следвайки изискванията и добрите практики на съставяне на подробен изследователски документ. Съдържанието започва с Увод и е последвано от четири глави, които излагат в логична последователност изследването на докторанта от мотивацията към изследователската хипотеза, нейното моделиране и верификация чрез резултати с експериментален прототип.

В Увода е позиционирана актуалността на темата за моделиране на индустриалените робот от тип SCARA на фона на общ преглед на разнообразните типове работи.

В първа глава е направен обзор на изследователската област, който представлява обобщение на анализи по четири направления.

Най-напред е направен функционален преглед на роботизираните системи изобщо, представена са три схеми класификация по основните им функции. Очертана, в това число и с формални дефиниции, е тясната предметна област на дисертацията – изследване на повишаването на степените на свобода при манипулационните работи.

Следващ предмет на преглед са подходите за моделиране на манипулационните работи чрез решаване на правата и обратната задача на кинематиката, както и за моделите на движение на статичните манипулатори.

Тъй като избрания верифициращ подход е чрез експерименти с прототип, са представени също обзори на хардуерния и софтуерния слой на цялостната архитектура на контролната система при този клас манипулатори. Софтуерната архитектура сама по себе си е разслоена, като са изследвани параметрите и вариантите на специализирани операционни системи и също на услугите на специализирания междинен слой – вкл. имплементациите със сърверна и безсърверна архитектура. Това изложение повдигна в мен въпроса каква е ролята на комуникациите от високо ниво (особено при безсърверни, т.е. peer-to peer, системи), които по принцип са приложими при групови модели на обслужване и по-типични при взаимодействащи мобилни (не фиксирани) работи. Но при фиксираните манипулатори също може да си представим сценарии на взаимодействие на няколко роботизирани ръце, и то не в режим на инцидентно избягване на динамични препятствия, а при синхронизиране на движенията в условията на реалновремеви ограничения. Затова намирам за полезно, ако в тази част на изложението беше разисквана сбито скалируемостта на модела, който адресира докторанта. И предлагам тази тема като допълнение към бъдещите ѝ изследователски планове.

Както виждаме такова разделяне на цялостния обзор е правилно и мотивирано от съставната или многокомпонентна предметна област, която за своите приложни цели изсква привличане на знания и сведения именно по тези основни направления.

Още във връзка с обзорната част може да се отбележи, че привлеченият списък от източници – 98 на брой, от които само няколко представляват автоцитиране – е достатъчен по обхват, задълбоченост и структура. Разпределен е балансирано между няколко обзорни теми. Самите източници са уместно цитирани – именно в обзорната

част. Качеството на теоретичните източници свидетелства за задълбочена работа. Разбира се присъстват и немалък брой източници с технически и справочни сведения. Реферирани са също привлечените диаграми и други графични фигури – в справочния Списък на фигурите (те също са в първа глава). Библиографската справка описва правилно отделните източници с техните пълни атрибути. Само (извинявам се за вметката) не можах да се ориентирам за реда на сортирането им.

Във втора глава «Моделиране на равнинен антропоморфен робот» се представят функционалните изисквания на изследвания робот и използваните методи за решаване на правата и обратната задача на кинематиката при допълнителни степени на свобода. Разработена е формализация на параметрите за решаване на съответните задачи на траекториите на движението на ставите, която позволява впоследствие да се алгоритмизира процесът на управление на ставите на манипулатора.

Трета глава «Управление на равнинен антропоморфен робот» третира въпросите за трансляцията на целевите координати към последователност от команди, които да привеждат актуаторните компоненти в подходяща последователност от междинни състояния – “преходни точки”. Описан е и проектът на системата за компютърно управление на експерименталния прототип. Съществената част от тази алгоритмична задача е намиране на път с минимална цена за желаната траектория. Направена е и времева оценка на използване подходи за решаването на тази задача.

Четвърта глава «Експериментална верификация, чрез 3D принтиран робот» са описани два симулационни експеримента, които се различават по среди на имплементация, както и експерименти с изготвен от дисертанта прототип. Избраният от дисертанта сценарий на експериментите е преодоляване на динамично възникващи препятствия и съответното препланиране на траекториите на ставите на манипулатора. Мотивиран е изборът на двете симулационни среди и са приведени графични доказателства за извършените симулации, както и за проведените експерименти с прототипа. При експериментите с прототипа са извършени в няколко случая с фиксирани и динамични препятствия. Критерият на проведените експерименти е формулиран така „избягване на сблъсък с него (т.е. препятствието) и възможно най-бързо връщане на хващача на работа към целевата траектория“.

Изложението във всички части на дисертацията е грижливо, лаконично и пълно с изключение на слабостите, които съм отбелязал в т. 6.

2. Данни и лични впечатления за кандидата

Познавам дисертантът Любомира Митева по повод на работата ѝ в докторантската програма Вградени системи. На всички изпити – приемни, специализирани изпити, атестации – както и при участие с доклади и публикации в работата на конференцията ISGT, тя се е проявявала като задълбочен и усърден млад изследовател. Винаги е получавала най-благоприятни отзиви от своите научни ръководители за справянето с поставените задачи, за проявената способност за интеграция в изследователски колектив и за коректността и лоялността ѝ в колегиалната общност.

3. Съдържателен анализ на научните и научноприложните постижения на кандидата, съдържащи се в представения дисертационен труд и публикациите към него, включени по процедурата

Важно предимство на работата е, че освен с анализ на абстрактни модели дисертантът е имплементирал прототип на основен модел случай и го е изследвал експериментално. Освен експериментална верификация на работните хипотези, при един по-разгърнат тестов план на експериментите на базата на този прототип могат да се получат интересни резултати за специалистите.

Много от резултатите на докторанта се отнасят към направление 4.1 физика (механика). Аз ще се спра предимно на резултатите от направление 4.6. Информатика и компютърни науки.

Към това направление отнасям част от целите на дисертацията, а именно:

2) Изследване и създаване на алгоритми за планиране на траектория за изследвания робот с допълнителни степени на свобода с цел преодоляване на статични и/или динамични препятствия и достигане до желана целева позиция;

4) Анализиране и подбор на подходящи хардуерни компоненти и проектиране на подходяща софтуерна система за управление на създадения робот с допълнителни степени на свобода

5) Верифициране на предложената хардуерна и софтуерна система за управление и на алгоритмите за планиране на траектория, чрез компютърна симулация и експеримент с проектираната роботизирана система.

Тези цели имат научно-приложен и чисто приложен характер, което е напълно оправдано от гледна точка на това, че верификационната програма на изследването включва прототипиране.

Дисертацията защитава успешно изпълнението на така поставените цели.

Към научно-приложните приноси на работата в Глава 3 е предложен е алгоритъм за планиране на траектория на планарния манипулатор, базиран на теорията на графите. От гледна точка на алгоритмичния анализ алгоритъмът е обосновано декомпозиран на две фази с по 4 стъпки на всяка фаза. Този алгоритъм е допълнен с модул за избягване на динамични препятствия в работното пространство в реално време. Коректността на алгоритъма е защитена чрез проведените експерименти.

Приложните приноси на дисертацията се отнасят към прототипирането на модела. Проектирана е хардуерна и софтуерна система за управление на планарния манипулатор, както и тестов план със съответните тестови случаи. В глава 4 са описани проведените експерименти с прототип на моделирания манипулатор с цел верификация на алгоритмите за планиране на траектория при наличие на статични или динамични препятствия в работното пространство на робота.

4. Аprobация на резултатите

Описаните от кандидатката шест публикации по дисертацията, както и самата дисертация и изготвения автореферат, се характеризират със следните черти:

(1) пълно, точно и коректно отразяват представения дисертационен труд;

(2) всички публикации по дисертацията са индексирани в SCOPUS или IEEEExplore и следователно може да се изчисли, че изискванията за публикационна активност са изпълнени с надвишение:

по-точно за общия индекс на автора RNSh по група показатели Г от ЗРАС могат да се направят следните най-консервативни наукометрични изчисления (по броя съавтори, точките от приложената справка и [индексите] от списъка публикации):

$RNSh = 1/3 \times 18 \text{ т.}[1] + 0.25 \times 30 \text{ т.}[2] + 0.5 \times 30 \text{ т.}[3] + 1/3 \times 18 \text{ т.}[4] + 0.5 \times 30 \text{ т.}[5] + 1/3 \times 18 \text{ т.}[6] = 53 \gg 30.$

Авторът не е приложил сведения за евентуално цитиране, но в Скопус се откриват три цитирания, ако не броим самоцитиранията. Този показател не се изисква по текущата процедура, но е свидетелство за успешна изследователска работа;

(3) всички публикации не са отчитани по предходна процедура;

(4) публикациите на кандидата са свободни от плагиатство предвид извършените проверки в рецензираните и индексирани издания както и машинната проверка на дисертационния труд и автореферата.

5. Качества на автореферата

Авторефератът пълно, точно и коректно отразява дисертационния труд и получените резултати.

6. Критични бележки и препоръки

Независимо от многобройните достойнства на дисертационния труд могат да се направят някои забележки и препоръки.

Като цяло избраното заглавие не отразява прецизно съдържанието. Както посочих, работата е посветена на моделиране на роботизирано устройство от тип манипулатор – „ръка“, която без да възпроизвежда съвсем близко човешката ръка, е предназначена да извършва част от функциите ѝ. Основните разлики са, че манипулаторът например типично оперира само два (или достатъчен брой) „пръсти“, чрез които осъществява функциите например по захват на предмети или друга специализирана (а не универсална) функционалност. В текста този актуатор правилно е наречен „хващач“. Същото се отнася и за броя „рамена“ и „стави“ – манипулаторът може да се конструира така, че за разлика от антропоморфна ръка да прониква зад различни по сценарий и топология статични или дори динамични прегради. Това е фокусът и на проведените в дисертацията изследвания на степените на свобода. Заглавието обаче, както и други части на дисертацията се позовава на „антропоморфен модел на робот“. Коректната формулировка е този израз да се замени от „манипулатор“, още по-конкретно

„равнинен манипулатор“ или – както дисертантът посочва, че изследва – „робот тип SCARA“. Това са важен и разпространен клас на индустриалните роботи, но все пак ако ги представим като „антропоморфен робот“ правим една не съвсем прецизна генерализация, която пречи за пряко идентифициране на изследователския фокус още в заглавието.

Друг проблемен термин е „модел“ (особено предвид, че заглавието гласи „Моделиране на ... модел ...“). В случая намирам думата „модел“ за паразитна. Под модел дисертантката разбира прототип, чрез който са проведени измервания и верификация. Например в 4.1 правилно е конкретизирано „Проектиране на 3D принтиран прототип *на робот*“ (без да броим за коректна генерализацията „на робот“).

Прецизното към съдържанието заглавие би било [Моделиране | Модел] ... на равнинен [робот тип SCARA | манипулатор | роботизирана ръка] [с [повече | допълнителни] степени на свобода]“. Не виждам защо е пренебрегнат в заглавието термина манипулатор, след като в текста той е използван десетки пъти – например в 2.4.1 роботът е наречен „равнинен манипулатор“. По принцип е препоръчително всеки обект или феномен в един научен труд да се описва с един термин дори и когато съществуват негови равностойни синоними.

На английски впрочем авторката е превела заглавието много по-коректно към съдържанието „Modelling and Control of an Anthropomorphic Robot Arm“. В този вариант може да се повдигат само (но много по-умерено) въпроси относно претенцията за антропоморфност. По мое мнение то трябва да гласи „Modelling and Control of a Planar Robotic Arm“, което е най-близко до съдържанието на работата и е на подходящо ниво на генерализация.

„С повече степени на свобода от необходимото“ е основната характеристика на изследвания манипулатор. Следователно трябва ясно и на централно място в работата (ако не и направо в заглавието) да се отговори на въпроса с колко „повече“ от „необходимото“. Сега отговорът на този въпрос открих само в едно изречение в края на параграф в 2.2 по следния начин „В дисертацията ще се разглеждат равнинни движения, затова е необходимо роботът да има повече от 3 степени на свобода“. Т.е. имплицитния отговор е, че „повече“ (в други параграфи обикновено се използва „допълнителни“) значи >3 . До колко стави се стига именно? За да си отговорим на този въпрос (на който също не открих явен отговор) можем примерно да преброим

планарните стави на прототипа от Фиг. 4.14. „Експериментална постановка за преодоляване на статични препятствия с 3D принтиран прототип на равнинен робот с допълнителни степени на свобода“ – видимо те са четири стави; и да, $4 > 3$. Струва си на някакво централно или поне обособено място в дисертацията да се разисква въпроса какво е въздействието на още повече допълнителни стави върху функционалните и нефункционални черти на планарния манипулатор, какви са ограниченията за нарастване на броя стави и т.н. Или най-малкото този проблем да бъде маркиран в секцията Бъдеща работа – например там на мястото на чисто техническото тривиално наблюдение, че „вътрешната памет на контролера Arduino е ограничена. Затова би било добре, за в бъдеще, да се добави външна памет към хардуерната система на робота“. В сегашния ѝ вид секцията „Перспективи за развитие“ бих окачествил като скромна и непълна на фона на наистина съществените отворени въпроси.

В глава 4. бих препоръчал по-системно и изчерпателно описание на тестовите случаи, така че да се мотивира пълнотата на цялостната експериментална програма. Това обикновено се реализира, като се приложи план на тестовите случаи и съответно да се приведе коефициента на изпълнение на заложените критерии за всеки проведен експеримент. Допълнително е полезно е да се въведе кратност проведените експерименти и съответно процент на успеваемост (ако е допустимо този процент да не е 100). В списъка с тестовите случаи трябва да се обоснове известна изчерпателност или представителност както по отношение на модела на заданията (сценариите за преместване на държача), така и по отношение на модела на препятствията – включително характеристики като форма, повърхности, а също и за кинематиката на подвижните препятствия. Не е задължително да се проведат и докладват всички набелязани случаи, но тестовата програма трябва да бъде ясно мотивирана и очертана.

Допълнително си струва да се обсъдят и може би да се формализират критериите за изпълнение. Преодоляването на препятствия отразява ли се на прецизността на крайното положение, както и на срока за изпълнение на движението. Тъй като верификационната програма съдържа и експерименти с прототип (много важно предимство на работата), и могло да се наблюдават и такива параметри на управлението, като заета памет, срокове за изпълнение на последователните контролни итерации и др. т. Такива технически параметри биха били много полезни при проектирането на серийни манипулатори. Изобщо при системите с обслужване в

реално време системата от срокове за изпълнение на последователните елементарни операции трябва да бъде ясно оразмерена. Заключение като „Роботът получава изпратените към него команди веднага и може да върне отговор веднага“ не дават ясен отговор за съответствието с определени числово формирани критерии.

Стилистични забележки.

Бих насърчил занапред авторката да се откаже от употребата на „булети“ в документите, а да индексира съответните текстови компоненти, което ще позволи реферирането им. Например сега във 2. глава на стр. 47. функционалните изисквания към робота са посочени с булети и ако ги преброим, се оказва, че това са 5 булета (на други места в дисертацията са и значително повече). Сега ако искам да възразя, че „съпротивлението на ставите“ е нефункционален (технологичен) параметър, макар че е изброен в списъка с функционалните параметри, ще ми се наложи да преброя кой е конкретния булет (в случая трети), но ако беше примерно 7ми или 10ти булет, вече се вкарва съществен потенциал за грешно позоваване при броенето.

„Към звената обикновено се закрепват различни по вид датчици и сензори.“ Трябва да се избере единият от двата чуждоезични синонима, а не да се оставят варианти „за всеки вкус“. Това важи за много дублетни термини из дисертацията, най-важните случаи от които са вече споменатите „робот“ – „манипулатор“ – „роботизирана ръка“ и „повече“ – „допълнителни“.

7. Заключение

След като се запознах с представените в процедурата дисертационен труд и придружаващите го научни трудове и въз основа на направения анализ на тяхната значимост и съдържащи се в тях научноприложни приноси, **потвърждавам**, че представеният дисертационен труд и научните публикации към него, както и качеството и оригиналността на представените в тях резултати и постижения, отговарят на изискванията на ЗРАСРБ, Правилника за приложението му и съответния Правилник на СУ „Св. Климент Охридски“ за придобиване от кандидата на образователната и научна степен „доктор“ в научната област 4. Природни науки, математика и информатика и професионално направление 4.6. Информатика и компютърни науки. В частност кандидатът удовлетворява минималните национални изисквания в

професионалното направление и не е установено плагиатство в представените по конкурса научни трудове.

Въз основа на гореизложеното, **препоръчвам** на научното жури да присъди на Любомира Лъчезарова Митева образователна и научна степен „доктор“ в научна област 4. Природни науки, математика и информатика, професионално направление 4.6. Информатика и компютърни науки, докторска програма „Информационни системи“ – Вградени и автономни системи.

02.06.2023 г.

Изготвил рецензията:

(проф. д-р Васил Цунижев)