

РЕЦЕНЗИЯ

От доц. д-р Денис Сафидинов Чикуртев – ИИКТ-БАН

Върху дисертационен труд за придобиване на образователна и научна степен „доктор“

Професионално направление: **5.1. Машинно инженерство**

Научна специалност: **“Роботи и манипулатори“**

Автор на дисертационния труд: **Ивайло Робертов Георгиев**

Тема на дисертационния труд: **Проектиране и управление на 3D принтирана хуманоидна ръка**

1. Актуалност на проблема и цел на изследванията

Човекоподобните (Хуманоидни) роботи са обект на множество изследвания и в процес на навлизане в употреба в редица държави. Различни компании и научни организации разработват собствени човекоподобни роботи, с цел приложение като обслужващи роботи в ежедневните дейности на хората или подпомагане дейностите в производствени процеси и индустрията като цяло. Въпреки засилените изследвания и напредъка в разработките все още липсват универсални решения, които да се предложат на масовия пазар. Съществуват редица предизвикателства като проектиране на устойчиви механични конструкции и платформи, намаляване на теглото, подобряване на подвижността, оптимизиране броя степени на свобода, разработване на подходи за управление, взаимодействие със среда и хора.

Проблема, разглеждан в дисертационния труд се отнася до иновация в производството на човекоподобна ръка, чрез използване на технологията на триизмерното принтиране. Представени са хардуерна система за задвижване на ръката и софтуерна система за управление. Анализирани са кинематичните характеристики и движенията на всеки пръст от ръката. Представените изследвания могат да се използват за производство, задвижване и управление на други роботизирани механизми или протези. Разработения прототип на човекоподобна ръка може да бъде интегриран към манипулатор и да се използва като краен ефектор за вземане и поставяне на предмети.

Считам, че тематиката на дисертационните изследвания е актуална поради все по-голямото търсене на решения за усъвършенстване на човекоподобните и колаборативните роботи. В допълнение технологиите за триизмерно принтиране се развиват значително през годините като в изследванията докторантът е представил именно тяхното широко приложение в сферата на роботиката.

Целта на дисертационния труд е: да се проектира и създаде 3D принтирана хуманоидна роботизирана ръка изградена на модулен принцип, както и да се изследват функционалните ѝ възможности. Всеки от пръстите на ръката да се задвижва от

независимо управляем двигател. Модулността се отнася до пръстите като включва хардуера и софтуера за управлението им.

За постигане на целта, докторантът е дефинирал следните задачи:

1. Да се извърши проучване и анализ на литературата в областта на роботиката и медицината за създаване на хуманоидни роботизирани ръце, като се обърне по-специално внимание на приложението на адитивни технологии в тази област.
2. Да се разработи подход за създаване на сглобени 3D принтирани пръсти на хуманоидна ръка. Като се ползва подхода да се проектира модел на хуманоидна ръка.
3. Да се изследват основни геометрични и кинематични характеристики на пръстите на човешка ръка.
4. Да се създаде прототип на хуманоидна ръка с модулни пръсти, който да включва механичните и хардуерните елементи на 3D принтираната ръка.
5. Да се разработи хардуер и софтуер за управление и настройка на 3D принтираната модулна хуманоидна ръка.
6. Да се разработи софтуер за възпроизвеждане на знаци от жестомимичната азбука, който да е приложим към създадения прототип.
7. Да се проведат експерименти потвърждаващи функционалността на 3D принтираната хуманоидна ръка.

2. Степен на познаване състоянието на проблема и обща характеристика на труда

Кандидатът показва задълбочени познания по тематика и особени по отношение на устройството на различни модели на човекоподобни ръце и принципа на работа на задвижващи механизми, серво-мотори и принципи на проектиране на механични модели, чрез използване на CAD приложен софтуер. В допълнение докторантът показва познаване на проблемите при тези системи, методи и подходи за решаване на тези проблеми и аналитично мислене. Използваната иновативна технология за триизмерно принтиране е усвоена добре от докторанта. Той показва задълбочени познания и умения за подготовка и моделиране на съставни компоненти на роботизираната ръка.

Дисертационният труд е структуриран в 5 глави, в обем от 115 страници. Представени са 53 фигури, 9 таблици, математически уравнения, 65 литературни източника и 5 приложения.

В Глава 1 е представен обзор на предметната област. В дълбочина е разгледана анатомията на човешката ръка и по-конкретни китката и пръстите, която включва преглед на характеристиките на кости и стави. Представени са стандартни граници на размерите костите на ръката и ставните ограничения. Докторатът е представил актуални тенденции и изследвания в областта на човекоподобни роботизирани ръце. Представена е систематизация на типовете механични структури и кинематични модели на ръце, разработвани от различни изследователи и компании в световен мащаб,

включително и в БАН. Описани са използвани хардуерни компоненти в роботизираните ръце като актуатори, сензори и микроконтролери. Споменати са тактилни сензори, сензори за електромиография и зрителни сензори. Анализирани са различни подходи за класификация на захвати като метод на Куткоски и "GRASP". Информацията в глава 1 е изцяло обзорна и информативна, като липсват елементи на критичност и дефиниране на изследователски проблеми в съответната научна област.

В Глава 2 е представен подход за създаване на сглобени пръсти, чрез триизмерно принтиране, без необходимост от процес на сглобяване. За успешно прилагане на подхода е представен списък от функционални изисквания, който включва брой степени на свобода, възможност за хващане, избор на материал, ставни механизми, избор на актуатори, дизайн на върховете на пръстите и минимизация. В подхода се представя дизайн на пръстите, които са съставени от 4 елемента. Елементите се отпечатват сглобени след процеса на принтиране. С цел подобряване на процеса на принтиране се описват подходи като „Оста на цилиндричните и конични участъци да се разполага перпендикулярно на масата за изграждане“, „Принцип на 45-те градуса“, „Принцип на двете опори“, „Минимални хлабини в лагерните участъци“. Представен е Алгоритъм за създаване на 3D принтиран сглобен механизъм, който се състои от 6 стъпки. Алгоритъмът обхваща целия процес за проектиране на триизмерен сглобен механизъм по технологията моделиране на разтопен материал (FDM). На края на глава 2 докторатът предлага модулен дизайн на пръстите и цялостен дизайн на човекоподобната ръка. Представени са подробни чертежи на съставните елементи на пръстите и е описан принципа на сглобяване.

В глава 3 е описан процеса по анализ на нуждите и избор на хардуер. Представени са хардуерни компоненти като постоянно токови двигатели, потенциометър и интегрална схема. Цялостен чертеж на монтажа на всички съставни механични и електронни елементи е представен и описан. След това се представят блокова диаграма и схема на свързване на електронните компоненти за един пръст. Представени са технически спецификации на използваните електромотори и потенциометри. Комуникацията между отделните микроконтролери и управляващ компютър се реализира чрез протокола I2C. Докторантът е описал детайлно същността на протокола I2C, и принципа на работа на комуникационен модул USB-ISS.

В Глава 4 е описан разработения софтуер за управление на роботизираната ръка. Нивата на управление са разделени на два части: управление на всеки пръст по отделно и управление на цялата ръка с цел хващане и показване на жестове, чрез различни приложни програми. Управлението на пръст се реализира чрез графичен интерфейс, който предоставя бутони и полета за въвеждане на данни. Този интерфейс е съставен от 5 менюта: ръчно движение, автоматично движение, задаване на позиция, промяна на комуникационен адрес и прочитане на текуща позиция.

Софтуерът за управление на цялата ръка е на по-високо ниво. Той е реализиран отново като приложение с графичен интерфейс. Приложението е написано с използване на програмния език Пайтън и предоставя функции за сгъване и разгъване на всички

пръсти. Управлението на жестовете от реализирано като отделна програма, където чрез графичен интерфейс могат да се избират буквите от английската азбука. Последно описания софтуер е за хващане на сферични и цилиндрични обекти. Той предлага множество бутони с предефинирани размери на предметите, които ще хваща. Накрая на глава е представено софтуерното осигуряване на ръката, където са описани използваните адреси и регистри за изпълнение на различните движения на ръката.

Глава 5 описва експериментална верификация на предложения проход, хардуер и софтуер. Проверяват се следните характеристики:

- Прецизност на движението: Може ли ръката да достигне желана позиция с висока точност и повтораемост?
- Сила и издръжливост на захвата: Може ли да хваща и задържа различни обекти без да ги повреди или изпусне?
- Възпроизвеждане на знаци от жестомимични езици: Могат ли да бъдат правилно пресъздадени знаците с ръка?
- Работно пространство: Определяне на областта на работа на пръстите на ръката, в която могат да бъдат манипулирани различни предмети.

Докторатът е представил анализ на работното пространство чрез кинематични характеристики. Проведените експерименти са: 1 - захващане на предмети от бита, 2 - захващане на принтирани обекти, 3 - формиране на жестове. Постигнатите резултати от експеримент 1 показват, че проектираната роботизирана ръка, може да хваща различни предмети със средна големина, но не може да хваща малки предмети като USB флаш памет. Също така може да задържа предмети с тегло до 85 грама.

Постигнатите резултати от експеримент 2 показват, че роботизираната ръка може да хваща цилиндри и сфери с различен диаметър. Като се споменава, че има трудности при хващане на малко предмети. Резултатите от експеримент 1 и 2 не са представени като измерим показател и липсва информация за процента на успеваемост.

Резултатите от експеримент 3, показват дали ръката е съвместима и способна да показва жестове от английската азбука на американски език. Резултата показва, че 20 от 26 жеста са възможни. Като е представена идея за решаване на проблема с липсата на комбинации за липсващите жестове.

3. Съответствие на предложената методика на изследване и поставените цел и задачи на дисертационния труд

Приложена е стандартна методика за решаване на научни и приложни проблеми. Структурата на дисертацията е подредена смислово като се започва с дефиниране на проблемите по тематиката и необходимостта от изследвания в тази област. След това се преминава към детайлно описание на характеристиките и методи за решаване на тези проблеми. Предложено е решение за проектиране на човекоподобна роботизирана ръка,

чрез използване на технология за триизмерно принтиране, накрая са проведени изследвания и тестове за верификация на роботизирана ръка.

4. Приноси

Докторантът е представил 6 приноса по дисертационния труд, категоризирани в две категории: научно-приложни и приложни приноси.

Научни-приложни приноси:

1. Разработен е подход за създаване на сглобени 3D принтирани пръсти на хуманоидна ръка. Предложен е иновативен дизайн, който позволява пръстите да се принтират като един обект с подвижни стави с помощта на FDM технология за печат. Това се постига чрез комбинация от фактори като: разположение и ориентация на пръста върху изграждащата платформа на 3D принтера; формата на ставите; хлабината между звената на пръста и процесите на печат. Подходът позволява създаването на напълно функционални пръсти, които могат да бъдат отпечатани сглобени.
2. Изследвани са геометрични и кинематични характеристики на пръстите на човешка ръка. Това включва зони на достижимост на върха на пръст от хуманоидна ръка със зависими движения, както и разпределението на коефициента на манипулативност в тях.

Приложни приноси:

3. Създаден е прототип на хуманоидна ръка с модулни пръсти. Модулните пръсти се печатат напълно сглобени на FDM 3D принтер, а модулността се изразява не само в механичните компоненти, но и в хардуерните елементи и разработения софтуер. Този приложен принос води до улесняване на монтажа на пръста и цялостното сглобяване на ръката. Модулните пръсти позволяват лесна замяна при повреда, еднотипност в управлението и настройването и други предимства.
4. Разработен е хардуер и софтуер за управление и настройка на 3D принтираната модулна хуманоидна ръка.
5. Създаден е софтуер за възпроизвеждане на знаци от жестомимичната азбука, който се прилага към 3D принтираната хуманоидна ръка.
6. Извършени са експерименти, които потвърждават функционалността на 3D принтираната ръка. Експериментите включват захващане на предмети и възпроизвеждане на езика на жестовете.

Приемам приноси от 1 до 5, които са коректно формулиран и валидни. Принос 6 обхваща дейност по експерименти и тестове, поради което не го приемам.

5. Публикации по дисертацията

Кандидатът е представил 5 научни публикации в дисертацията. Всички от публикациите са реферирани в Scopus. Докторантът е съавтор с научния си ръководител във всички публикации и не е представил самостоятелна публикация. Всички

представени публикации са цитирани в текста на дисертацията. Получените точки от публикациите надвишава значително минималните за Институт по Роботика – БАН и показва, че наукометричните показатели са изпълнени.

6. Мнения, препоръки и бележки

Прави добро впечатление, че работата на кандидатът и представените системи и технологии, намират пряко и реално приложение в сферата на роботиката, триизмерното принтиране и машинното инженерство. Постигнатите резултати могат пряко да окажат положително въздействие върху сектора на човекоподобните роботи, технологиите за моделиране на механични конструкции и подходи за изграждане на сглобени механични структури.

Препоръчвам публикуване на самостоятелни изследвания. Препоръчвам допълване на библиографията с още източници.

Заклучение

Представеният дисертационен труд отговаря на съвкупността от критерии и показатели за придобиване на образователната и научна степен „доктор“, съгласно Закона за развитие на академичния състав в Република България (ЗРАСРБ), Правилника на БАН за прилагане на ЗРАСРБ, Правилника на специфичните условия за придобиване на научни степени и за заемане на академични длъжности в ИИКТ-БАН. В заключение давам **положителна оценка** на дисертационни труд.

Убедено препоръчвам на научното жури да присъди на **Ивайло Робертв Георгиев** образователната и научна степен „доктор“ в професионално направление **5.1. Машинно инженерство**.

Дата: 20.11.2025 г.

Член на журито:

(доц. д-р Денис Чикуртев)