



**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО РОБОТИКА**

България, София 1113, ПК 79, ул. "Акад. Г.Бончев", Бл.2,
Тел. (+359 2) 8703361, 4053055, Факс: (+359 2) 4053061

Почетен член на "Съвета на Европейската научна и културна
общност"

Ивайло Робертов Георгиев

**Проектиране и управление на 3D принтирана
хуманоидна ръка**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация
за придобиване на образователната и научна степен
„Доктор“

по професионално направление 02.01.52 - "Роботи и манипулатори"

Научен ръководител:

проф. д-р Иван Чавдаров

гр. София, 2025 г.

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита от разширен семинар на секция „Роботизирани и мехатронни интелигентни системи“ към Институт по роботика - БАН

Изследванията по дисертационния труд са извършени в Институт по роботика - БАН

Защитата на дисертационния труд ще се състои в зала 427, бл.2 в Институт по роботика - БАН

Материалите по дисертационния труд са на разположение в канцеларията на Институт по роботика – БАН

Благодарност: Изказвам уважение и благодарност към научния мениджър за ценните указания и практически препоръки при създаването на настоящата дисертация.

Научно жури:

1. проф. д-р Таньо Танев - ИР-БАН
2. доц. д-р Нина Влъчкова - ИР-БАН
3. проф. дн Иво Малаков - ТУ- София
4. проф. д-р Панчо Томов - ТУ-София
5. доц. д-р Денис Чикуртев - ИИКТ-БАН

Автор: Ивайло Робертов Георгиев

E-mail: rainship@gmail.com

Заглавие: Проектиране и управление на 3D принтирана хуманоидна ръка

Актуалност на темата

Хуманоидните роботизирани ръце са популярна тема на изследване в роботиката. Антропоморфните (от старогръцки, антропос – „човек“; и морфе – „форма“) роботизирани ръце са проучвани и развивани в продължение на години като една от ранните разработки е роботизираната хуманоидна ръка протеза Белград създадена от професор Райко Томович от института “Михайло Пупин” през 1963 година [43]. Протезната ръка е допълнително проучена и тествана, което води до създаване на подобрена версия през 1966-67 година и изработване на 35 броя от прототипа [45]. Хуманоидната ръка Белград се състои от 5 подвижни пръста, адаптиращи се по повърхността на хващания обект. Системата за управление е базирана на един сервомотор с вградена функционалност за блокиране, което позволява фиксиране на позицията на пръстите.

В началото на 80-те години на миналия век голяма част от механичните ръце представляват хващачи, състоящи се от два пръста или индустриални ръце с възможност за бързо закрепване на инструмент за работа. Ръката Солсбъри, създадена от д-р Кенет Солсбъри през 1982 година с финансиране от НАСА, представлява трипръстов манипулатор за хващане, предназначен за свързване към робота Animation 560 (PUMA) [44]. Всеки от трите пръста на ръката Солсбъри има три степени на свобода на движение. Ръката се управлява от 12 електродвигателя с предавателно число 25:1, които задвижват 12 нишки (по 4 за всеки пръст). За прецизна обратна връзка, системата включва сензори за опън на нишките и оптични енкодери за всеки двигател.

Оттогава насам хуманоидните ръце бележат бързо развитие подкрепено от иновациите в електрониката, сензориката и управлението. Днес антропоморфните ръце намират приложение в редица области на науката, медицината и индустрията. В медицината роботизираните ръце се използват като протези-заместители на ръце [2]. Друго приложение е в телемедицината (дистанционна хирургия) и телерехабилитация на ръце и лекуване на пациенти от разстояние [3,4]. Трето приложение на хуманоидните ръце в роботиката е за дистанционно управление на прецизни движения в опасна за човека среда като космоса [5, 13] и като част от конструиран хуманоиден робот.

Цел и задачи на дисертацията

Целта на дисертацията 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.

От целта произтичат 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.

Структура на дисертационен труд

Структурата на дисертационния труд се състои от Увод, 5 глави и Заключение и е с обем от 115 страници. Приложени са 53 фигури, 9 таблици, цитирани са 65 източника. В автореферата номерацията на фигурите и таблиците съответства на тази от дисертационния труд.

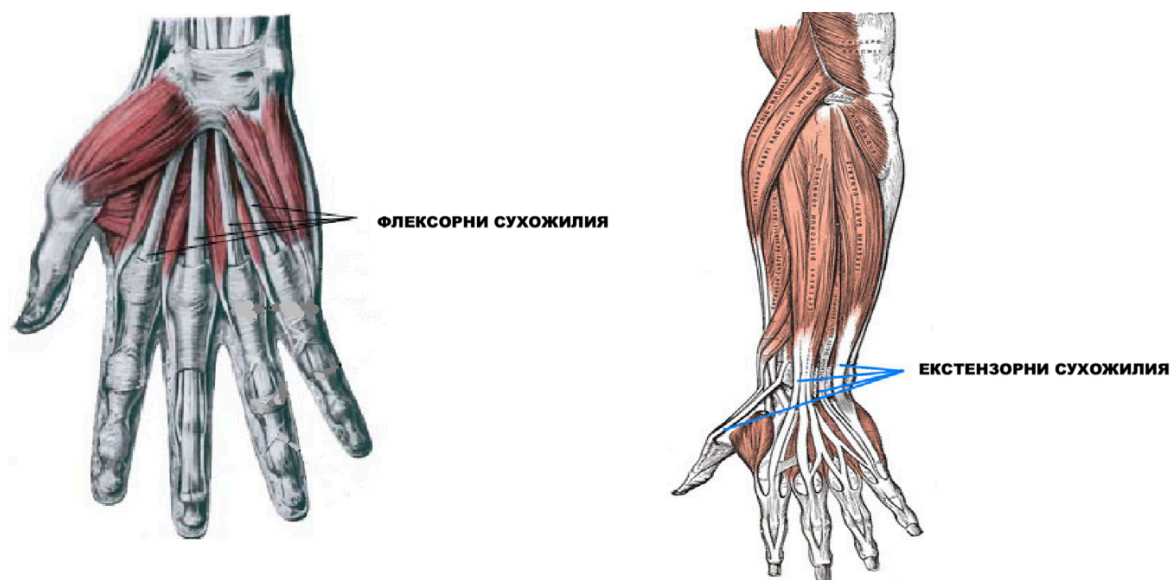
1. Обзор на предметната област

Разгледани са различните видове хуманоидни ръце и техните приложения, както и анатомията на човешката ръка. Анализирани са основните компоненти от хуманоидната ръка като актуатори, сензорика, управляващи системи, както и кинематични модели на ръце, класификации на захвати. Анатомично човешката ръка се състои от кости, стави, сухожилия, мускули, нерви, кръвоносни съдове, заградени от външен слой кожа. Костите на ръката се състоят от фаланги, метакарпални и карпални кости като човешкият пръст е изграден от фаланги и една метакарпална кост. Карпалните и метакарпалните кости са “скрити” под непрекъснат слой от кожа и не представляват интерес на това изследване. Палецът притежава две фаланги, докато останалите пръсти разполагат с по три фаланги. Разположението на фалангите, гледано от най-близката до дланта към най-отдалечената, са: проксимална фаланга, средна фаланга и дистална фаланга. В областта на роботиката терминът фаланга е еквивалентен на понятието звено на робота. Костите на ръката са свързани помежду си посредством стави. Проксималната и средната фаланга са свързани чрез проксимална интерфалангеална става, а средната и дисталната фаланга - с помощта на дистална интерфалангеална става. Палецът е с една интерфалангеална става.



Фигура 1. Кости и стави на човешката ръка

В управлението и дизайна на разработената хуманоидна ръка в тази дисертация се използват актуатори и нишки инспирирани от съществуващи мускули и сухожилия в човешката ръка. Пръстите на човешката ръка се сгъват и разгъват с помощта на специални мускули. Мускулите, които позволяват сгъване на пръстите навътре, се наричат флексори. Флексорите започват от лакътя, преминават в сухожилия и стигат до върховете на пръстите. Флексорните сухожилия в пръстите преминават през канали. Това предотвратява отдалечаването им от костта. Обратното движение или разгъването на пръстите се осъществява чрез мускули екстензори и екстензорни сухожилия. Те, подобно на флексорните сухожилия, също преминават през канали и достигат до върховете на пръстите. В разработената механична ръка ролята на мускули, задвижващи пръстите, изпълняват постояннотокови двигатели, но за целите на минитюаризацията и минимизацията моторите са събрани в дланта на ръката. При дизайна на роботизираната ръка са добавени отвори във вътрешността на пръстите, в които се намират нишки, достигащи до върховете на механичните пръсти по подобие на каналите и сухожилията в човешката ръка.



Фигура 2. Флексорни и екстензорни сухожилия на човешката ръка

Разгледаните хуманоидни роботизирани ръце от литературата са сравнени в Таблица 3 по категориите: предназначение, брой степени на свобода на ръката, актуатори и механика, сензорика, използвани технологии.

Таблица 3. Сравнителна таблица на хуманоидни ръце

Роботизирана ръка	Предназначение	Степени на свобода	Актуатори, начин на задвижване	Сензорика	Използвани технологии
Робонавт 2 [5]	Заместител на астронавти в открития космос	12 (ръка) +2 (китка)	Постояннотокови двигатели, нишки	- Датчик на Хол - сензор за опън на нишките - тактилни	- Галванизация със злато - нишки, изтъкани от специални материали
БАН ръка [6]	Жестомимичен език	10	Серводвигатели, нишки, еластична пружина	- кинект сензор - Ръкавица за управление	- 3D принтиране
InMoov ръка [9]	Безплатно разпространение на 3д файловете му и развитие от много хора по света	14 (ръка) +1 (китка)	Серводвигатели, нишки	- кинект - Датчик на Хол	- 3D принтиране
Университет Вашингтон [10]	Научно изследване	20	Пневматични цилиндри, нишки	- Тактилни	- 3D принтиране
Shadow ръка [11]	Индустриален контрол на качеството, работа с опасни материали	20	Постояннотокови двигатели или пневматични изкуствени мускули, нишки	- Датчик на Хол - Тактилни (BioTac) - Сензор за опън на нишките - Сензор за налягане	- интегриран в ROS операционна система

Роботизирана ръка	Предназначение	Степени на свобода	Актуатори, начин на задвижване	Сензорика	Използвани технологии
Gifu III ръка [12]	Изследване на прецизно захващане и манипулация на робот	16	Серводвигатели, шарнирен четиризвенник	- тактилни сензори - Сензори за сила	- RTOS операционна система
DLR II ръка [13]	Заместител на астронавти в космоса	13	Постоянно-токови двигатели, ремъци, конусни зъбни колела, шарнирен четиризвенник	- Датчик на Хол - Потенциметри - Сензори за сила и въртящ момент	- Дизайн, базиран на тестове във виртуална среда
DART ръка [14]	Работа с компютърна клавиатура	16 (ръка) +3 (китка)	Серводвигатели, шарнирен четиризвенник, нишки	- Датчик на Хол - Сензор за натиск	- 3D принтиране
Universitat Politecnica de Valencia ръка [15]	Протеза	15	Серводвигател (палец), Стъпкови двигатели, нишки, макара	- Сензор за натиск - ЕМГ сензор	- 3D принтиране - 3D сканиране
BIT ръка [16]	Протеза	6	Линейни двигатели	- ЕМГ сензор	- LDA алгоритми за разпознаване на намерения
KIT ръка [17]	Протеза	10	Постояннотокови двигатели, нишки	- сензор за разстояние - камера - инерционен измервателен уред - ЕМГ сензор	- 3D принтиране - визуално възприемане на средата чрез камера

С най-много степени на свобода (20) се открояват ръцете Shadow и създадената в университета на Вашингтон. Тези ръце могат да реализират сложни движения и захвати, но сред недостатъците им са високата цена и тежестта на актуаторите. Моделът, разработен в университета на Вашингтон, е позиционирал пневматичните цилиндри извън ръката. Това отхвърля възможността на двете механични ръце да се използват като протези. В роботиката съществуват мехатронни системи, при които броят на актуаторите е по-малък от степените на свобода на движение. Това се постига с пасивни степени на свобода, които добавят допълнителна степен в кинематичната верига [33]. Такъв пример е ръката-протеза KIT, която има само два актуатори вградени в дланта на ръката. Това намалява тежестта на ръката, но лимитира способността ѝ за прецизни захвати. Хуманоидната ръка БАН използва еластичен елемент пружина, с който добавя допълнителна пасивна степен на свобода за всеки пръст. Ръцете Робонавт 2 и DLR II са създадени от космически агенции и са предназначени да са част от хуманоидни роботи. Големият брой сензори и напреднали технологии увеличават многократно цената им спрямо другите механични ръце. Недостатък на ръката DLR II е и по-малкият брой пръсти на ръката (4) спрямо човешката. Сред разгледаните ръце съществува такава с отворен и безплатен достъп до дизайна на файловете си - ръката InMoov. Това увеличава популярността на модела ръка и води до много разработвания и подобрения на ръката от хора по целия свят. Ръката DART разполага с достатъчно степени на свобода, но нейното предназначение за писане върху компютърна клавиатура може да бъде заменено от изцяло софтуерно решение. Мнозинството от разгледаните примери използват нишки за задвижване на пръстите на ръката, вдъхновени от анатомичната структура на човешката ръка. Сгъването и разгъването на пръстите на ръката се извършва с помощта на флексорни и екстензорни сухожилия, които преминават през канали и достигат до върховете на пръстите. Хуманоидната ръка на космическия робот Robonaut 2 [5] използва специална нишка за задвижване на пръстите Vectran™, избрана заради здравината си и устойчивостта на разтягане. Някои от разгледаните хуманоидни ръце използват 3D принтирани механизми за сгъване и разгъване на пръстите. Хуманоидната ръка на БАН [6] използва нишки за сгъване на пръстите и 3D принтирани еластични пружини, които използват натрупаната потенциална енергия за разгъване на пръстите. Ръката inMoov [9] използва 3D принтирани макари, към които са закачени две нишки - за сгъване и разгъване на пръстите. Някои от разгледаните хуманоидни роботизирани ръце използват механизма шарнирен четиризвенник за задвижване на пръстите. Предимство на този вид дизайн са

твърдите връзки на ставите, които в сравнение със задвижванията с нишки, са по-устойчиви и стабилни механизми. При многократно сгъване и разгъване на пръста нишката променя дължината си, което нарушава точността и повтаряемостта при движението на пръста. Особеност на механизма е, че актуатор е свързан с твърда връзка за структурата на пръста, с което се осъществява движението на структурата наподобяващо траекторията на движение на човешки пръст. Това се постига с експериментиране на различни дължини на твърдите връзки на механизма и избор на дължините, които най-точно възпроизвеждат пътя на движение на човешкия пръст [14]. Сред разгледаните хуманоидни ръце най-използвани актуатори са постояннотоковите [5, 11, 13, 17] и серво двигатели [6, 9, 12, 14, 15]. По-рядко срещани са пневматичните цилиндри [10], пневматични изкуствени мускули [11], линейните двигатели [16] и стъпкови мотори [15]. Широко използвани от примерите в литературата са тактилните сензори [5, 10, 11, 12], които предоставят информация за физически контакт и позволяват работа в неструктурирана среда и манипулиране на непознати предмети. Някои ръце като [11] използват тактилни сензори с течности, които при натиск променят налягането си. Протезите [15-17] използват сензор за електромиография (ЕМГ), който служи за наблюдение на електрическата активност на мускулите. Върху кожата на човешката ръка се поставят електроди над мускули, имащи ключово значение за движението на пръстите. Електродите предават мускулната електрическа активност на ЕМГ сензора. Необходимо е предварително сензора да се калибрира и настрои за всеки човек, за да се използва коректно в управлението на ръката. Други използвани сензори в хуманоидните ръце са датчик на Хол, сензори за сила и за опън на нишките. Ръката KIT [17] използва технологията компютърно зрение като основен сензор за възприемане на околната среда. Компютърното зрение анализира изображения, за да извлече информация за дадена сцена, което е от решаващо значение за модерната роботика. То може да се използва за разпознаване на предмети, проследяване на движение и управление на изпълнителните звена. Разпознаването на предмети се осъществява чрез комбинация от компютърно зрение и изкуствена невронна мрежа (ИНМ). ИНМ е алгоритъм за машинно обучение, чийто модел е вдъхновен от биоелектричните мрежи в мозъка. Той се състои от неврони и техните връзки (синапси). Всеки неврон в мрежата получава претеглени сигнали от предходния слой и обработва свой собствен изходен сигнал, който предава на следващия слой. За да функционира ефективно, невронната мрежа трябва да бъде предварително обучена с голям обем от данни, известни като обучаваща извадка. Този процес на

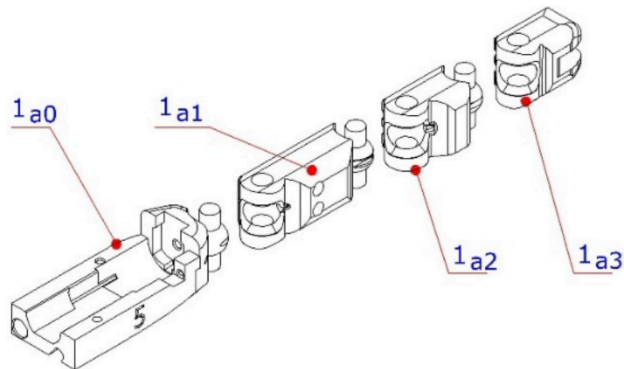
обучение позволява на системата да разпознава различни предмети с висока точност.

Сензорите, задвижващите механизми и другите електронни компоненти трябва да се управляват от надеждна хардуерна и софтуерна система, захранвана от подходящ източник на енергия. Миниатюризация и минимизиране на хардуерните компоненти са необходими за някои случаи на протезни ръце. Използването на по-малко хардуерни компоненти също означава по-малко потребление на енергия и по-евтина и енергийно ефективна роботизирана ръка. В зависимост от приложението на хуманоидната ръка има различни хардуерни и софтуерни реализации за контрол на нейните движения. В литературата се срещат контролни системи, базирани на микроконтролер, свързан към компютър чрез безжична Bluetooth технология [47]. Въпреки че този контрол не е подходящ за протеза, той е добра отправна точка за разработване и тестване на прототип на ръка. В [48] Arduino Uno микроконтролер съвместно с микропроцесор Raspberry Pi се използват за управление на движенията на роботизирана ръка. Чрез замяна на големия компютър с по-малък микропроцесор за обработка на логика и контрол, ръката може да се носи на открито, което може да се приложи при ръцете-протези. В литературата се срещат и примери за Field-Programmable Gate Array (FPGA или програмируема логическа матрица), използвана за управление на хуманоидни ръце, но недостатък е, че FPGA има ограничени ресурси като таблици за търсене, регистри, DSP сигнални процесори и блок RAM [49]. Софтуерните решения за управление на хуманоидни роботизирани ръце варират от компютърно базирана система за управление [12] до по-напреднали техники като машинно обучение и невронни мрежи [50].

2. Дизайн и механика на 3D принтирана роботизирана хуманоидна ръка

Представен е иновативен дизайн на хуманоидна роботизирана ръка. Иновативните елементи и дизайн в представената хуманоидна ръка са модулността на пръстите, отпечатването на напълно сглобени пръсти и фактът, че всички контролни и задвижващи елементи се побират в дланта. Целта на настоящата работа е да се разработи достъпна хуманоидна ръка, която има добра функционалност и възможност за персонализиране на размерите. Решението на това предизвикателство е намерено чрез използване на предимствата на технологията за 3D печат и модулния дизайн. При изработване на ръката е

използван материал Poly-lactic acid (PLA). Човешката ръка притежава 27 степени на свобода на движение [52], позволявайки широк диапазон на движение и сръчност. Възпроизвеждането на това ниво на сложност в роботизирана ръка е значително предизвикателство. С цел минимизацията на хардуерните компоненти, някои от степените на свобода на движение на пръстите и китката са пропуснати при дизайна на описаната хуманоидна ръка. Задвижващи механизми като постояннотокowi мотори и нишки, се използват за генериране на силите, необходими за движение на пръстите и захващане на предмети. Дизайнът на върховете на пръстите е проектиран с подходящи форми за ефективно захващане на предмети. В повечето случаи в литературата конструирането на 3D принтиран хуманоиден пръст включва процес на сглобяване от няколко части, за да се постигне финално желаня резултат и функционалност. При дизайна на разработената роботизираната хуманоидна ръка всеки пръст се състои от 4 елемента (Фиг. 24), които са директно сглобени чрез технология за 3D печат. По този начин се спестява време от монтажа на пръста и се улеснява цялостното сглобяване на ръката.



Фигура 24. Компоненти на пръста

Принтер с моделиране на разтопен материал (FDM) се използва за направа на пръстите и ставите, свързващи отделните компоненти на пръстите. Формата на ставите е специално пригодена за 3D печат, така че елементите да могат да се изграждат едновременно и да бъдат директно сглобени без прилагане на носещи конструкции по време на печат. При проектиране на сглобени ротационни възли

създадени с FDM технология за печат се предлага да се спазват следните принципи:

- Оста на цилиндричните и конични участъци да се разполага перпендикулярно на масата за изграждане:

Например ако принтираме обект с кръгъл отвор, който е разположен с ос успоредна на равнината на изграждащата платформата, то отвора ще се деформира от силата на гравитация.

- Принцип на 45-те градуса:

При принтиране ставните връзки не трябва да залепват, за да може пръста да извършва ротационни движения. Това се постига чрез завъртане на ставите на 45° при процеса на печат, което е половината от възможното движение на ставната връзка.

- Принцип на двете опори:

Когато се създава сглобен механизъм често има повърхнини, които трябва да са успоредни на изграждащата платформата. Участъци по-големи от 1 до 1.5 милиметра не могат да се изработят без използване на поддържащи структури (съпорти), което на практика създава две опори.

- Минимални хлабини в лагерните участъци

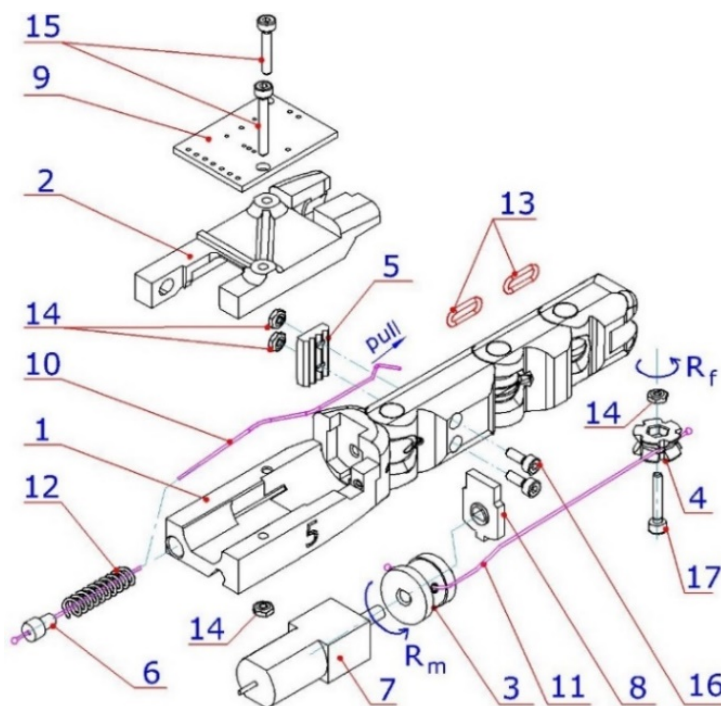
Друг важен аспект при проектирането на лагерни участъци е осигуряването на хлабина (луфт) между елементите на сглобката. Тази хлабина е необходима, за да не възникне триене, което да доведе до прегряване или повреда. За плъзгащи лагери с диаметър 6 милиметра, оптималната хлабина обикновено е в порядъка на 0.03 милиметра. Това позволява ефективно смазване и правилно функциониране на лагера, като същевременно минимизира луфта, който би могъл да доведе до нестабилност или вибрации.

- Изборът на минимален диаметър за плъзгащите лагери

Изборът на минимален диаметър за плъзгащите лагери се определя от няколко ключови фактора. От една страна, по-малкият диаметър води до намаляване на съпротивителния триещ момент, което подобрява ефективността на

механизма. Друго съществено предимство е, че това обикновено води до компактни размери и намаляване на общата цена на механизма. Въпреки тези предимства, съществуват и технологични ограничения. Например, при изработка с 3D принтер, минималният диаметър е лимитиран от възможностите на машината, като в случая не може да се принтират лагери с диаметър под 4 милиметра. Освен това диаметърът на лагерите се съобразява с размерите на човешката ръка.

На базата на предходните описани принципи е проектиран и изработен модел на пръст с директно сглобени елементи. Правилното и надеждно функциониране на ставите на пръста, така че да имат минимално съпротивление по време на движение, се определя от много фактори. Сред тях са диаметърът на ставата, хлабината между елементите, материала за печат и процесите на печат. Хлабината между елементите на ставата е критичен фактор. Експериментално е верифицирано, че хлабина с размер от 0,2 милиметра е достатъчна за създаване на функциониращи ставни връзки. Тази стойност е избрана като минимално възможна, която да позволи движение без съпротивление, компенсирайки недостатъчната точност на печата. Изборът на минимален диаметър на ставата от 5.2 милиметра също е съобразен с цел да се намали съпротивлението от триене и да се постигне по-компактен и лек дизайн на пръста, което е от съществено значение за хуманоидни роботизирани ръце. След приключване на процедурата на 3D печат е нужно ставните връзки да бъдат раздвижени на ръка. Не е необходимо да се прави друга допълнителна постобработка на принтирания пръст. Пръстите на ръката притежават модулен дизайн (идентични са) като се различават единствено по дължините на фалангите и ставните ограничения. При дизайна на пръстите размерите на различните фаланги са взети от реални медицински изследвания на пациенти [7]. Модулният дизайн позволява бърз демонтаж и монтаж на нов пръст при необходимост. Модулният дизайн на пръста включва идентична механична, сензорна и контролна система дадена на Фиг. 26. Пръстът е съставен от шест 3D отпечатани елементи: 1 - тяло с фаланги; 2 - капак; 3 - задвижваща макара; 4 - опъваща ролка; 5 - притискаща капачка; и 6 - подвижна пружинна капачка. Тези елементи се произвеждат с помощта на FDM технология за 3D печат.



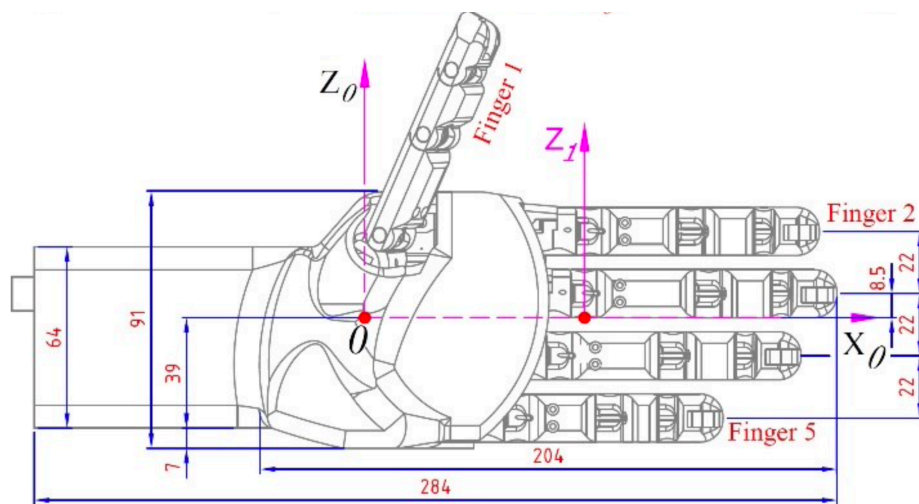
Фигура 26. Основни компоненти на пръст от ръката

1- тяло на пръста; 2 – капак; 3- задвижваща макара; 4 - въртяща се ролка; 5 - притискаща капачка; 6- подвижна пружинна капачка; 7 – мотор; 8 – потенциометър; 9 - печатна платка (PCB); 10 и 11 – нишки; 12 – пружина; 13 – гумени ластичи; 14 до 17 – крепежни елементи.

Пръстите на ръката могат да реализират две движения - сгъване и разгъване. Сгъването на пръст се осъществява от мотор 7 (Фиг. 26), върху чиито вал е закрепена задвижваща макара 3. През канали във вътрешността на пръста минава нишка 11. Единият край на нишката 11 е завързан за задвижващата макара 3, а другият край е закрепен за ролка 4, монтираната на върха на дисталната фаланга на пръста. При необходимост нишка 11 може да се натяга от въртящата се ролка 4 чрез ротационно движение R_f . След фиксиране на нишката, ролката 4 се затяга с болт 17. При зададена команда за сгъване (или разгъване) на пръст, постояннотоков мотор 7 извършва ротационно движение R_m , което довежда до намотаване (или размотаване) на нишката 11 около макара 3. Това движение заедно с факта, че нишката 11 е вързана към върха пръста, води до сгъване му. За обратното действие (разгъване) на пръста спомагат пружина 12, работеща под натиск, нишка 10 и два гумени ластика 13. Спомагащата за разгъването на пръста нишка 10 е фиксирана в единия край към подвижната пружинна капачка 6, а в другия край е притисната от притискаща капачка 5. Еластичната потенциална

енергия от елементите пружина 12, ластиси 13 и нишка 10 води до разгъване на пръста в момента, в който моторът 7 отпусне нишка 11.

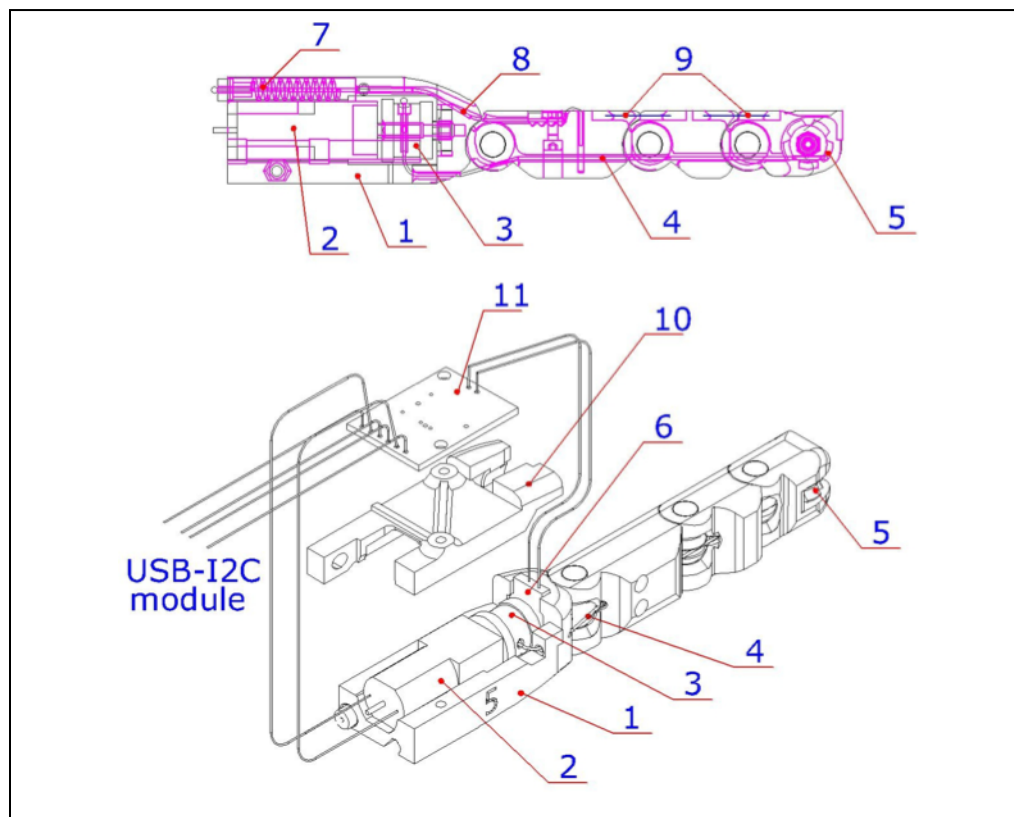
Размерите на дланта и ръката са идентични с тези на средностатистически човек. Подобно на човешката ръка, палецът е противопоставен на останалите пръсти за лесно захващане на предмети и боравене с различни пособия. Ръката е проектирана с помощта на програмата AutoCAD Mechanical и се състои от 5 модулни пръста, основа и преден капак като всеки от тези елементи е разпечатан на FDM 3D принтер. Технологиата 3D печат позволява изграждане на детайли с кухини, които могат да служат за добра основа за разработка и тестване на прототипи. С цел миниатюризация и минимизация вътрешността на ръката е куха, за да се съберат в дланта контролиращия хардуер, свързващите кабели и модулните пръсти. За задвижване на три фаланги на даден пръст се използва един двигател. Това води до компактен и лек дизайн (тегло на ръката - 324 грама) като в същото време се запазва здравината, функционалността и се повишава ефективността на прототипа. При дизайна на ръката за по-лесен монтаж на пръстите са добавени плъзгачи и винтове към които всеки пръст се захваща. Освен това всеки пръст е номериран и отпечатан с число от 1 до 5, което допълнително спомага при сглобяването на ръката. Дланта на ръката е проектирана вдлъбната с цел лесно захващане на сферични предмети от пръстите. При проектирането на ръката са добавени два отвора във външната обвивка на ръката - за външно захранване и за включване на USB I2C интерфейсен модул за предаване на команди към ръката.



Фигура 29. Схема на хуманоидната роботизирана ръка

3. Описание на хардуера

Представен е хардуера на разработената хуманоидна роботизирана ръка, който има основна роля за определяне на нейната функционалност, способността ѝ за прилагане на сила и хващане на предмети. Изпълнението на задачи с висока точност и повтаряемост от роботизираната ръка зависи пряко от правилния подбор на нейните хардуерни компоненти. Разработената роботизирана ръка използва съвкупност от хардуерни компоненти като постояннотокови двигатели, позиционни сензори (потенциометри) и I2C комуникационен протокол за обмен на данни. Модулният дизайн на пръст включва и хардуерната му система. Всеки пръст от ръката има своя собствена интегрална схема за управление и може да се контролира независимо от останалите. Хардуерните компоненти на даден пръст и тяхната свързаност са показани на фигура 30.

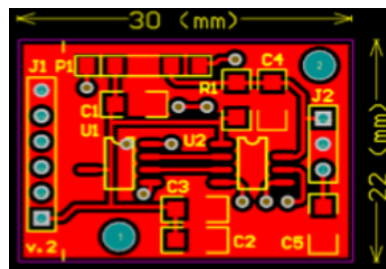


Фигура 30. Хардуерни и механични компоненти на пръст

1 – тяло на пръста, 2 – постояннотоков мотор; 3 – макара, 4 – нишка за сгъване на пръста; 5 – ролка; 6 – потенциометър; 7 – пружина; 8 – нишка за разгъване на пръста; 9 – гумени ластиси; 10 – капак; 11 – интегрална схема.

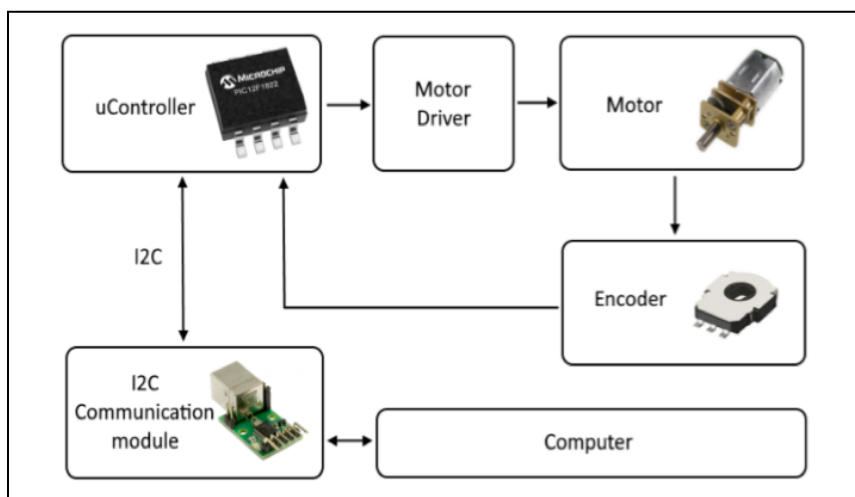
Модулът за управление на пръст 11 е директно свързан с USB I2C комуникационен модул, който служи за изпращане на команди за управление на пръстите. От друга страна модулът за контрол на пръст 11 е свързан също така и с двата изхода (плюс и минус) на постояннотоков четков мотор 2. Тъй като има само два изхода, посоката на въртене на постояннотоковия четков мотор се контролира чрез размяна на полярността на подаваното напрежение. Ако подадем напрежение от “+” на захранването до “+” на мотора и от “-” до “-” на мотора, то той се движи в една посока, а ако разменим полярността, то той ще се движи в друга посока. Размяната на полярността се осъществява с помощта на Н-мост, който е съставен от четири превключвателя, които позволяват подаване на напрежение в двете посоки към мотора. Модулът за управление 11 е свързан още и с позиционния сензор 6 (резистивен потенциометър), който служи като обратна връзка за позиция на пръст. Съпротивлението на потенциометъра е в пряка зависимост и се променя от движението на мотора 2, тъй като сензорът е закрепен върху макара 3, монтирана върху оста на двигателя.

Всяка интегрална схема за управление на пръст е проектирана да бъде идентична с останалите, превръщайки всеки пръст в отделна и напълно независима единица за управление. Този модулен подход значително опростява проектирането, поддръжката и евентуалната подмяна на компоненти. Самият контролен модул е изключително компактен, побирайки се на една интегрална схема с размери само 30x20 милиметра (Фиг. 31), която се закрепва стабилно с болтове към специално проектиран 3D отпечатан капак. Захранването на тази миниатюрна управляваща платка е външно, с напрежение от 5V, което е стандартно за цифровата електроника.



Фигура 31. Модул за управление на пръст

За да функционира правилно роботизираната хуманоидна ръка, всеки един пръст е изграден като автономен и модулен компонент. Това позволява лесно сглобяване и поддръжка. Ключът към тази функционалност се крие в ефективната интеграция на хардуерните елементи, визуализирана чрез блоковата диаграма на фигура 32. Блоковата диаграма показва логическите връзки между основните хардуерни компоненти, които изграждат модулния пръст - потенциометър, постоянен ток двигател, драйвер на мотора, микроконтролер и I2C комуникационен модул. От компютъра чрез комуникационния модул се изпраща команда за движение на пръст. Съобщението се предава по I2C протокол до микроконтролера за съответния пръст. Микроконтролерът обработва получената заявка и подава сигнал към драйвера на мотора за извършване на движение. Енкодерът формира обратна връзка за точното позициониране на пръста.



Фигура 32. Блокова диаграма на хардуерните компоненти

Всеки модулен пръст е управляван от 8-битов микроконтролер PIC12F1822 от производител Microchip, поместен в компактен корпус SOIC-8. Въпреки че този контролер разполага само с шест входно-изходни (I/O) порта, той е напълно достатъчен за целите на тестването и валидирането на движението както на отделните пръсти, така и на цялата роботизирана ръка. Всеки пръст от ръката се задвижва от отделен постоянен ток електрически мотор. За осигуряване на обратна връзка и прецизно отчитане на текущата позиция на пръста, към оста на всеки двигател е закрепен резистивен потенциометър EVW-AE4001B14.

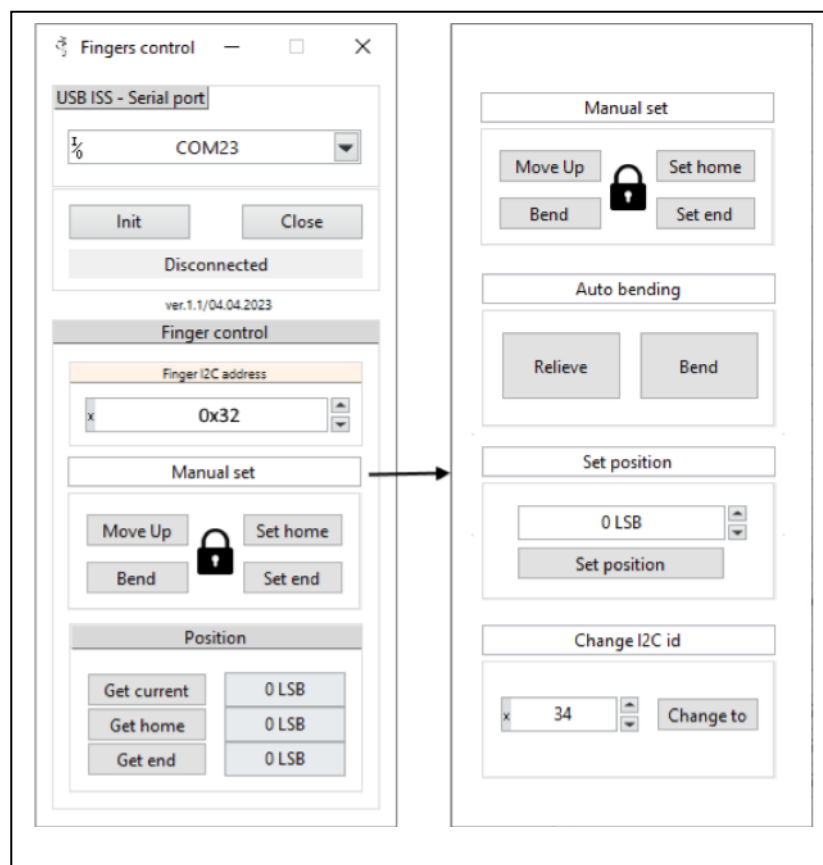
Микроконтролерът PIC12F1822 е хардуерно свързан към драйвера на мотора SIP2100 (пинове GP5 и GP4) и резистивния потенциометър (пин GP0 - Position FB). Използвайки пинове GP1 и GP2 микроконтролерът е свързан с I2C комуникационната линия по два сигнала - SDA (сигнал за данни) и SCL (сигнал за честота). Повече информация за тези два сигнала е предоставена в глава 3.5.1. На фигура 33 са дадени още интегралните схеми на свързване на USB комуникационния модул и резистивния потенциометър.

4. Софтуер за управление на ръката

Първата разработена програма за управление на хуманоидната роботизирана ръка, позволяваща проверка и тестване на функционалността, е показана на фигура 38. Софтуерната среда LabView е използвана като платформа, която се характеризира с графичен език на програмиране, формирайки логически диаграми наподобяващи блок схеми. Програмата работи върху операционната система Windows. Интерфейсът първоначално инициализира връзката с главното USB-ISS устройство като свързването е чрез използване на сериен комуникационен порт. Софтуерът може да контролира само един пръст в даден момент чрез задаване на идентификатор (slave адрес) на съответния пръст. Адресите на пръстите са както следва: палец 0x34; показалец 0x36; среден 0x38; безимен 0x3A; малък пръст 0x3C. Всеки нов пръст преминава през еднократен процес на инициализация в програмния интерфейс. Новите модули са програмирани с базов идентификатор 0x32 и по време на инициализацията новият адрес се препрограмира в зависимост от позицията на пръста. Тъй като началната позиция на пръста (ориентацията на потенциометъра) варира, новите модули преминават през процедура на задаване на гранични позиции – начална позиция, когато пръстът е напълно изпънат и крайна позиция, когато е максимално сгънат. По време на този процес операторът ръчно премества пръста до желаните гранични позиции и ги маркира като такива. Контролерът идентифицира позицията въз основа на съпротивлението на потенциометъра. Всички параметри от процеса на инициализация се съхраняват в EEPROM паметта. Програмата има няколко подменюта със специфична функция:

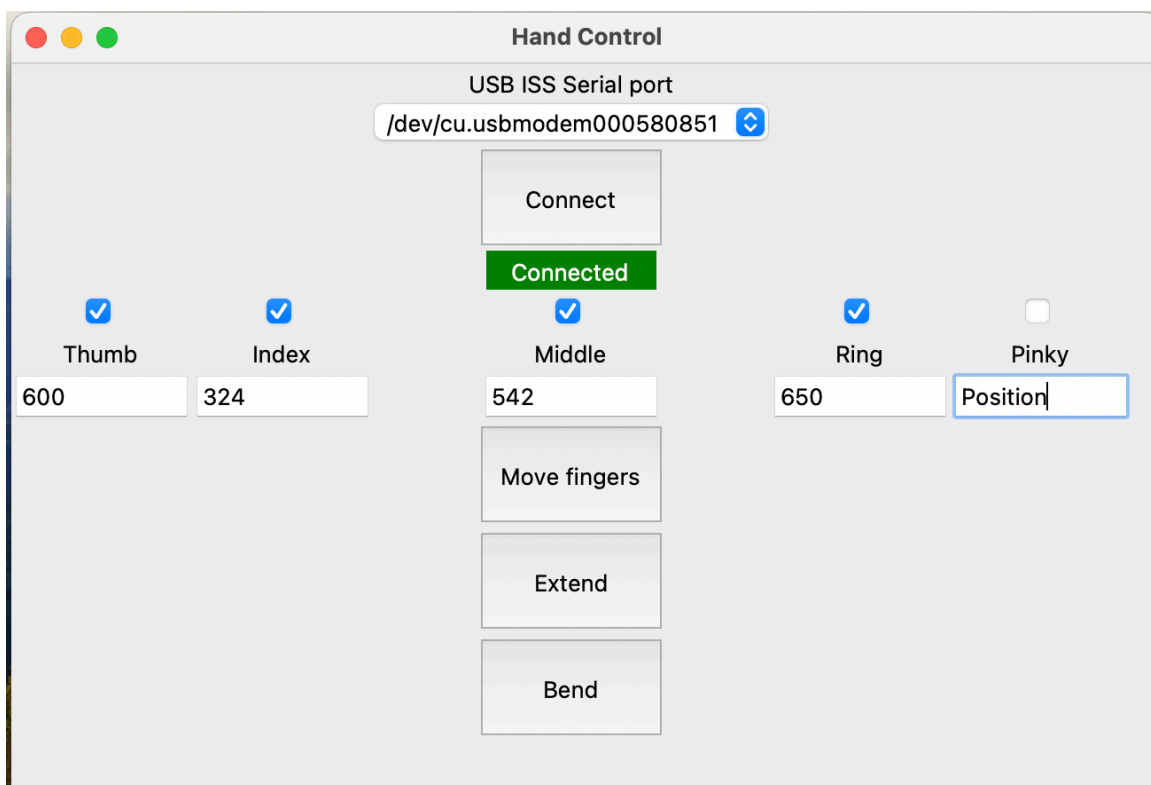
- Manual (Ръчно движение) – тук операторът може да управлява и движи пръста с малки стъпки в определена посока до дадена позиция чрез натискане на бутон. При нормални условия позицията е възможна, ако е между границите – начална и крайна позиция, извън тях движенията се спират. В някои случаи (като първоначалната инициализация на пръста) са необходими движения извън граничните точки. В този случай има бутон за отключване, който прави това възможно. В това меню има и бутони за настройка на начална и крайна позиция на пръста.

- Auto bending (Автоматично движение) – меню с бутони за достигане до гранични позиции. Пръстът автоматично се придвижва до начална или крайна позиция и спира сам, когато ги достигне.
- Set position (задаване на позиция) – Задава се конкретна позиция, която е между границите – начална и крайна позиция, и до която пръстът се придвижва и спира при достигането ѝ.
- Change I2C id (Промяна на I2C slave адрес) – позволява промяна на I2C адрес на определен пръст.
- Position - софтуерът има опция за четене на текущата позиция на пръста (Get current), както и на граничните позиции (Get home и Get end).



Фигура 38. Софтуерен интерфейс за контрол на пръст

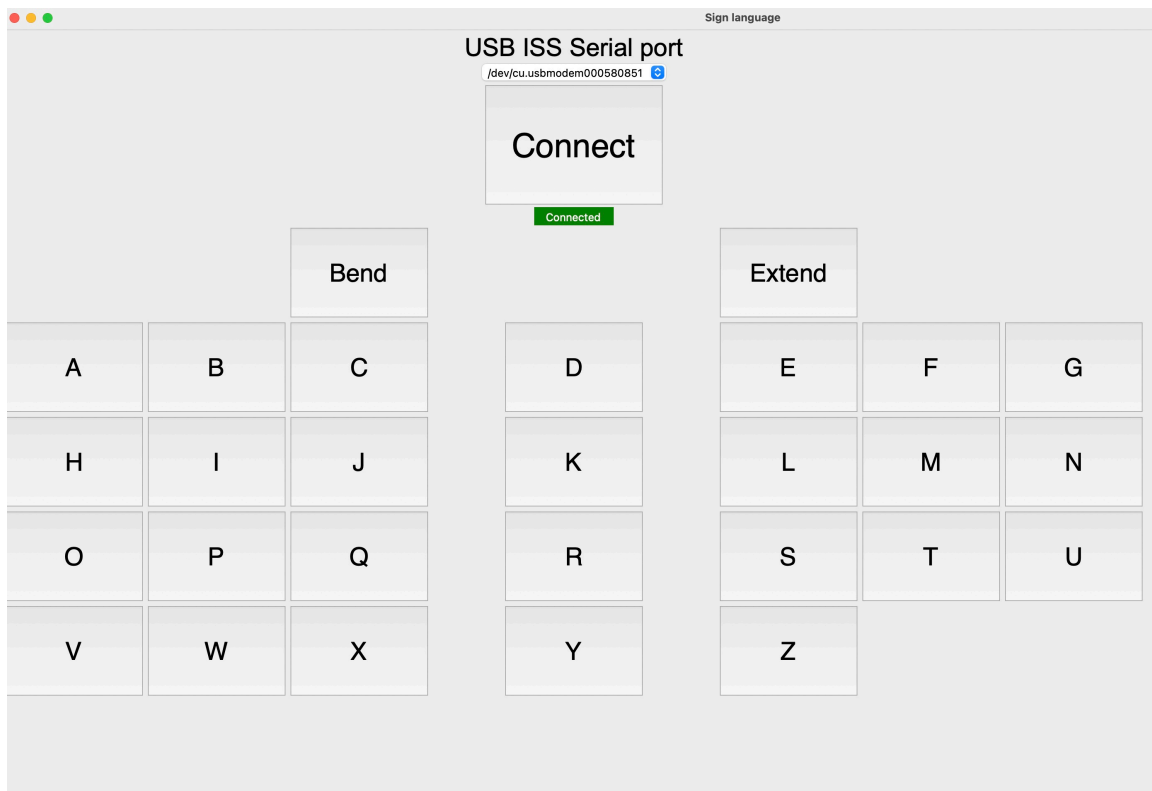
Второто разработено приложение за управление на ръката (фиг. 39) е създадено на езика за програмиране Python. Програмата може да бъде стартирана върху операционните системи Windows и macOS. Графичният потребителски интерфейс е разработен с помощта на стандартната вградена библиотека tkinter. За разлика от предишния софтуер, базиран на LabVIEW, който позволява управление само на един пръст в даден момент, настоящата програма предлага значително по-голяма гъвкавост, позволявайки контрол както на отделен пръст, така и на набор от пръсти или дори на всички пръсти едновременно. Тази подобрена функционалност разширява значително възможностите за експериментиране и приложение на системата.



Фигура 39. Софтуерен интерфейс за контрол на ръката

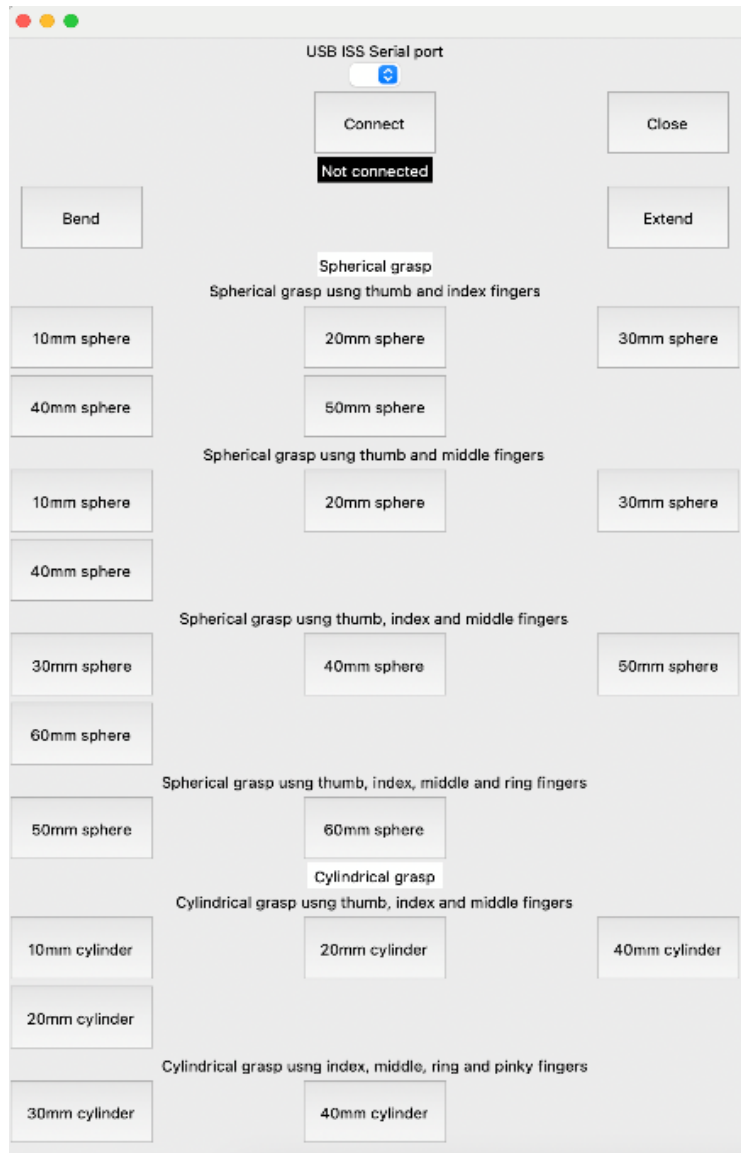
Програмата разполага с отметки за всеки пръст, чрез които може лесно да се избере кои пръсти да бъдат задвижвани. Освен това, в интерфейса са добавени полета "Position" (Позиция), където потребителят може да въведе конкретна стойност, до която съответният пръст ще се премести. Важно е да се отбележи, че движението се осъществява единствено в предварително зададения интервал между началната и крайната позиция на пръста; извън тези граници движение не е възможно. Това ограничение осигурява безопасност и предпазва роботизираната ръка от потенциални повреди.

Разработен е трети софтуер, който представлява иновативно приложение за жестомимичен език (фигура 40), специално проектирано да формира жестове от азбуката на американския жестомимичен език (ASL). Това приложение предоставя отлични възможности за задълбочено тестване на сръчността, прецизността и механичните ограничения на хуманоидната роботизирана ръка. Американският жестомимичен език включва 26 сложни жеста, като всеки от тях съответства на конкретна буква от английската азбука. В програмата са интегрирани бутони за свързване на устройството ("Connect"), за пълно сгъване на пръста ("Bend") и пълно разгъване на пръста ("Extend"). Ключов елемент на интерфейса са и бутоните, съответстващи на всяка буква от ASL азбуката, което позволява директно изпълнение на съответния жест. Важна функция за безопасност и информираност на потребителя е вграденото предупреждение. Ако някой специфичен жест, съответстващ на дадена буква, се окаже невъзможен за изпълнение поради механични ограничения на ръката, автоматично се появява предупредителен прозорец. Това гарантира, че операторът е своевременно информиран за физическите граници на работа и предпазва системата от потенциални повреди.



Фигура 40. Софтуерен интерфейс за знаци от жестомимичната азбука

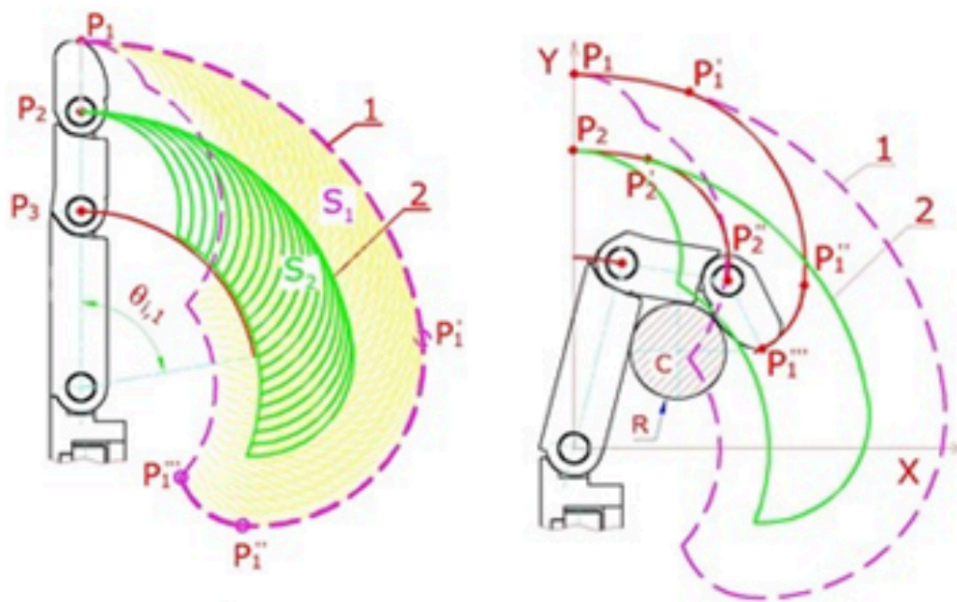
Разработена е четвърта програма за захващане на сферични и цилиндрични обекти (Фиг. 41). Основната функция на програмата е да реализира захвати на сферични и цилиндрични предмети с диаметър от 10 до 60 милиметра чрез използване на различен набор от пръсти. Сфера или цилиндър с даден диаметър и определена конфигурация на пръстите могат да бъдат захванати с помощта на съответния бутон в програмата. Като пример от менюто на програмата, сферично захващане с палец и показалец може да се осъществи чрез използване на който и да е от бутоните за сферичен обект с диаметър 10, 20, 30, 40 или 50 милиметра.



Фигура 41. Софтуерен интерфейс за захващане на сферични и цилиндрични предмети

5. Експериментална верификация чрез 3D принтиран модел

Тестовият процес на 3D принтираната хуманоидна ръка е важен етап от жизнения цикъл на разработка, който е критичен за гарантиране на надеждността, безопасността, ефективността и дълготрайността на крайния продукт. Важно да се определи е и работно пространство - областта на работа на пръстите на ръката, в която могат да бъдат манипулирани различни предмети. Създадена е програма на Visual Lisp за AutoCAD, която позволява графично представяне на работното пространство и достижимите точки от пръста на хуманоидна ръка.

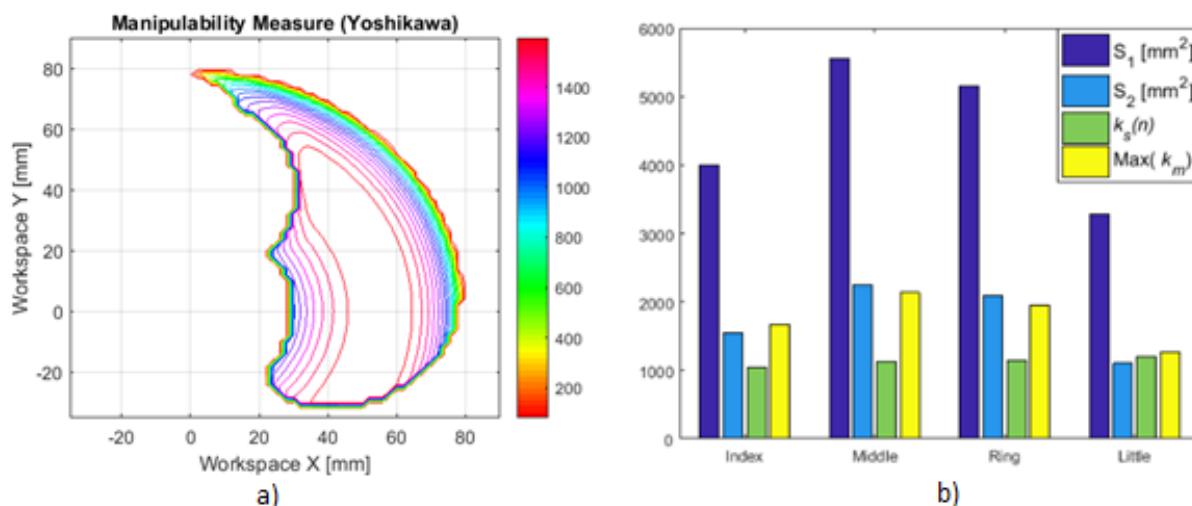


Фигура 42. Работни пространства на точки P1, P2 и P3. Траектории на точки P1, P2, P3 от показалеца, при хващане на цилиндричен обект с диаметър 20[mm] и координати $S_x = 21[mm]$, $S_y = 20[mm]$

Точка P1 се намира на върха на показалеца, докато P2 и P3 са точки от звената на дисталната и средната фаланга. Ако няма обект в обхвата на пръста, точка P1 ще се движи по дъгата P1P1'P1''P1''' (фиг. 42 вляво). Ситуацията е различна, ако в работната зона има обект (фиг. 42 вдясно). Първоначално моторът задвижва пръста само чрез промяна на ъгъла θ_1 , докато проксималната фаланга достигне цилиндричния обект. Тъй като обектът оказва съпротивителна сила на това движение, то спира и започва завъртане на втория ставен ъгъл θ_2 , докато

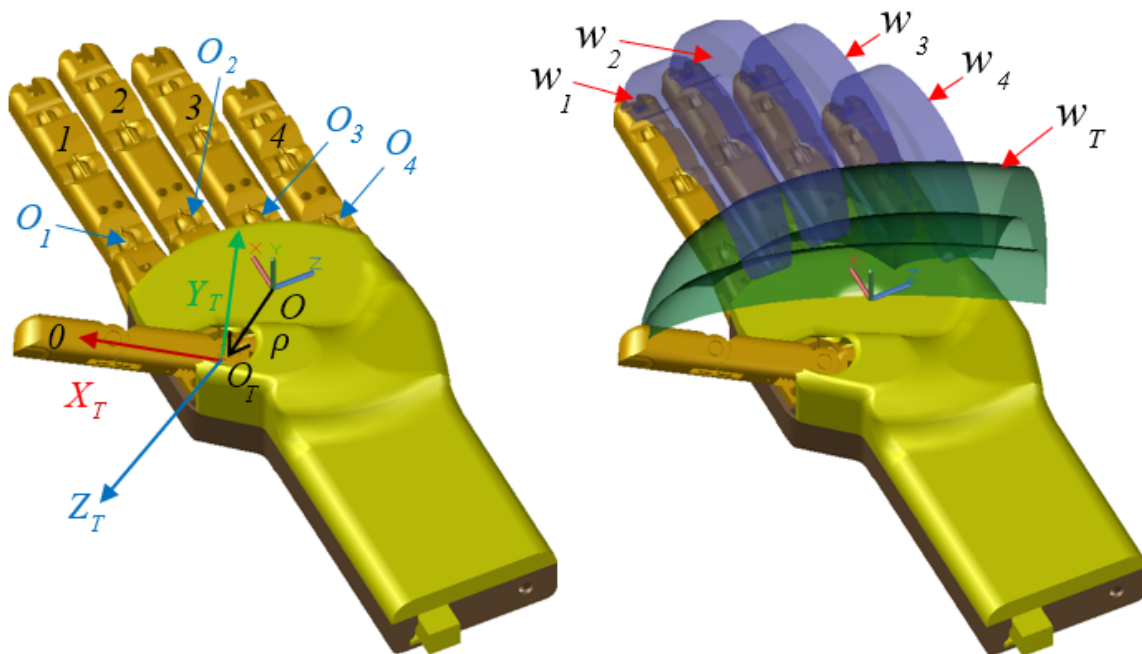
медиалната фаланга достигне предмета. Накрая, дисталната фаланга извършва движение, променяйки ъгъла θ_3 до достигане на предмета. Траекториите на точки P1, P2, P3 са представени на Фиг. 42 вдясно. В зависимост от позицията и размерите на хващания предмет, точка P1 ще има различни траектории в работното пространство. В този смисъл за проектирания пръст може да се каже, че зона S1 е условно работно пространство за върха на пръста.

Коефициентът на манипулативност позволява да се избере такава конфигурация на ставите, която може да се използва за изпълнение на желаната задача с най-висока скорост. За тази цел се търси конфигурация на ставите, при която стойността на коефициента на манипулативност е най-голяма. Фиг. 43 а) илюстрира промяната на коефициента на манипулативност в работното пространство на показалеца. За всяка точка от работното пространство се определя максималният коефициент на манипулативност. От фигурата е видно, че този пръст има нисък коефициент на манипулативност по границата на работното пространство и висок във вътрешната му част. Това означава, че е трудно да се контролират прецизните движения в граничните области, докато точни движения могат да бъдат извършвани в централната област. На фиг. 43 б) са представени S1, S2, $k_s(n)$ и максималните стойности на коефициента на манипулативност k_m . От фиг. 43 б) се вижда, че средният пръст има най-големи площи (S1, S2), както и най-голяма стойност на коефициента на манипулативност $\text{Max}(k_m)$ [61].



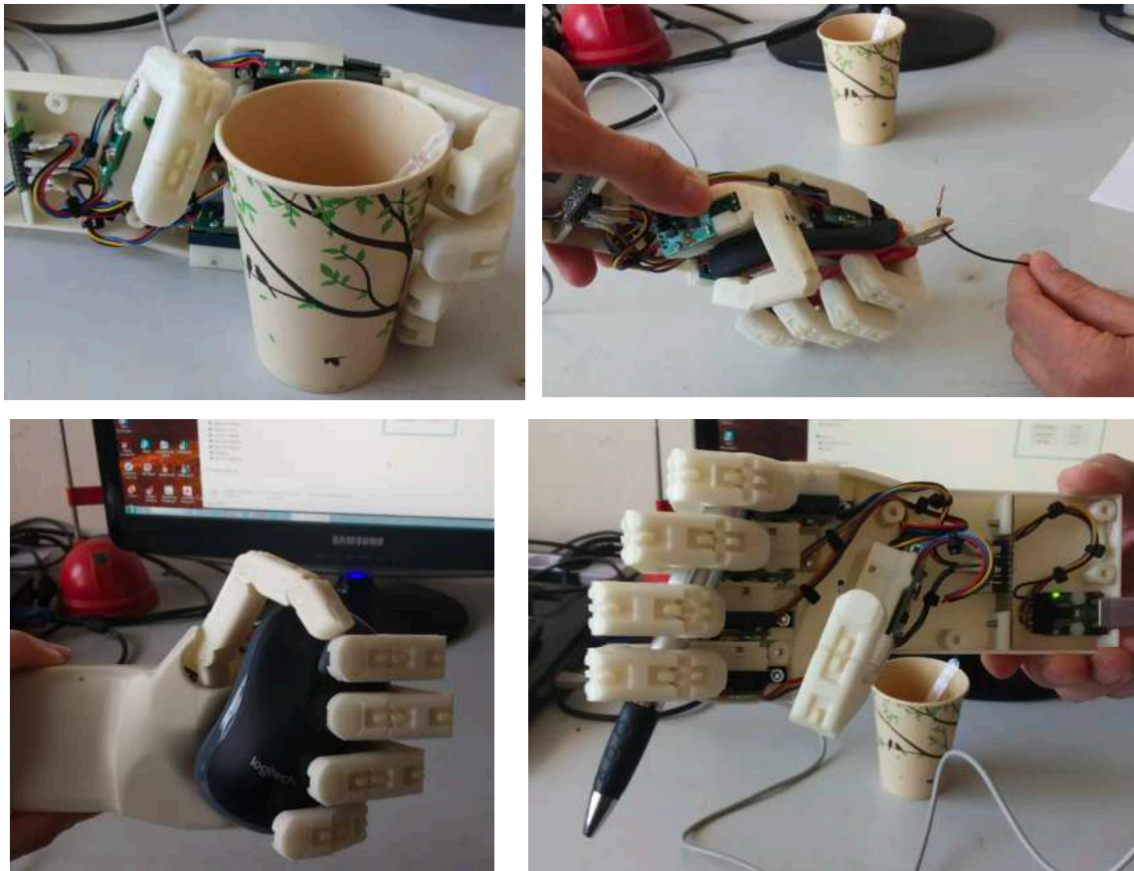
Фигура 43. а) Максимален коефициент на манипулативност за всяка точка от работното пространство на показалеца. б) Сравнение на площите, $k_s(n)$ и максималния коефициент на манипулативност на всеки пръст

На фигура 44 вляво е представена диаграма на ръката с фиксирана координатна система ($OXYZ$), локализирана в центъра на дланта, както и втора координатна система на палеца на ръката ($O_T X_T Y_T Z_T$). Използвайки правата кинематична задача и променяйки ъглите на ставите в рамките на ограничения им, се получават точките на достижимост на върховете на пръстите (фиг. 44 вдясно). Четирите пръста (от 1 до 4) извършват равнинни движения, дефинирайки свои индивидуални работни пространства (W_1 до W_4). За разлика от тях, палецът е противопоставен и разполага със свое уникално работно пространство (W_T), което му позволява да взаимодейства с останалите пръсти и да извършва по-сложни дейности като хващане и задържане на предмети. Очевидно е, че за да бъде захванат даден предмет, е необходимо неговата повърхност да попадне в работно пространство на пръст или в сечение на няколко работни пространства. Колкото по-голямо е припокриването, толкова по-стабилен е захватът. Например, хващането на голям обект често изисква съвместното действие на няколко пръста, докато за прецизно хващане на малък обект е достатъчно взаимодействието между палеца и един от останалите пръсти.



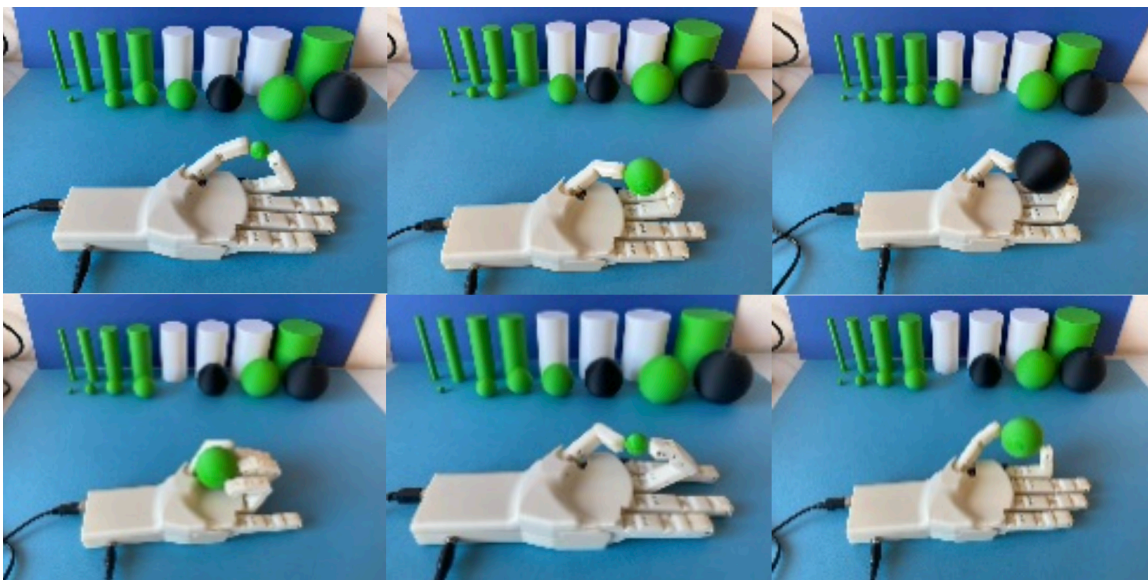
Фигура 44. Координатни системи и 3D модел на работните пространства на пръстите

За да бъдат изследвани реалните възможности на роботизираната ръка е необходимо да се проведат функционални експерименти със захващане на различни предмети от ежедневието като чаша за кафе, химикал, клещи и други. Тези експерименти разкриват слабостите в дизайна, както и ефективността на използваните сензори и алгоритми за управление. Така например, захващането на картонена чаша изисква фина преценка на силата, докато боравенето с инструмент като клещи предполага здрав захват и стабилност. Извършени са тестове за хващане на предмети като картонена чаша, клещи, компютърна мишка, химикал (Фиг. 45), дистанционно управление, лупа. Както е видно от снимките на проведените експерименти, роботизирана ръка има способността успешно и надеждно да манипулира средно големи предмети. Захващането на много малки предмети като USB флаш памет остава трудно приложимо с текущата механична структура на ръката.



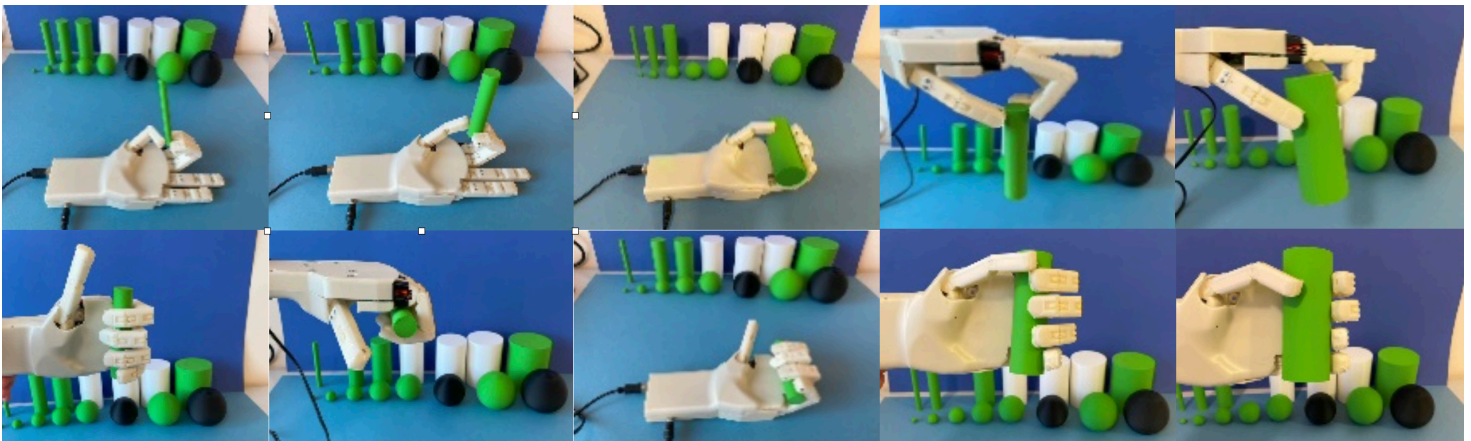
Фигура 45. Експерименти със захващане на предмети: картонена чаша, клещи, компютърна мишка, химикал

Захващането на основни геометрични фигури като сфери и цилиндри е фундаментално изискване за всеки манипулатор в областта на роботиката и в частност за хуманоидните роботизирани ръце. Задържането на сфера с ръка представлява предизвикателство заради липсата на плоски повърхности, които да осигурят стабилен захват. Това налага прецизен контрол на силата и точно позициониране на пръстите, за да се предотврати изплъзване. За целта на изследването са 3D отпечатани няколко сфери с диаметри, вариращи от 10 до 60 милиметра (Фиг. 48). Експериментите се състоят от опити за захващане на създадените сферични предмети от пръстите на роботизираната ръка като захватът може да бъде изпълнен от различни конфигурации от пръсти. Тестовите показват, че при захващането на по-малки сферични предмети участват само два пръста – палецът и показалецът. Този захват е изключително ефективен за прецизна манипулация и осигурява достатъчно стабилност като създава две точки на контакт. Силата се разпределя равномерно между двата пръста, което предотвратява изплъзването. Захващането на по-големи сферични предмети изисква използването на комбинация от три или повече пръсти. В този случай пръстите обгръщат по-голяма част от повърхността на сферата, създавайки множество опорни точки. Колкото по-голям е предмета, толкова повече пръсти са необходими за разпределяне на силата и осигуряване на стабилен захват. Палецът играе ключова роля като опора, докато останалите пръсти се адаптират, за да осигурят пълно обгръщане на предмета.



Фигура 48. Експерименти с 3D принтирани сфери

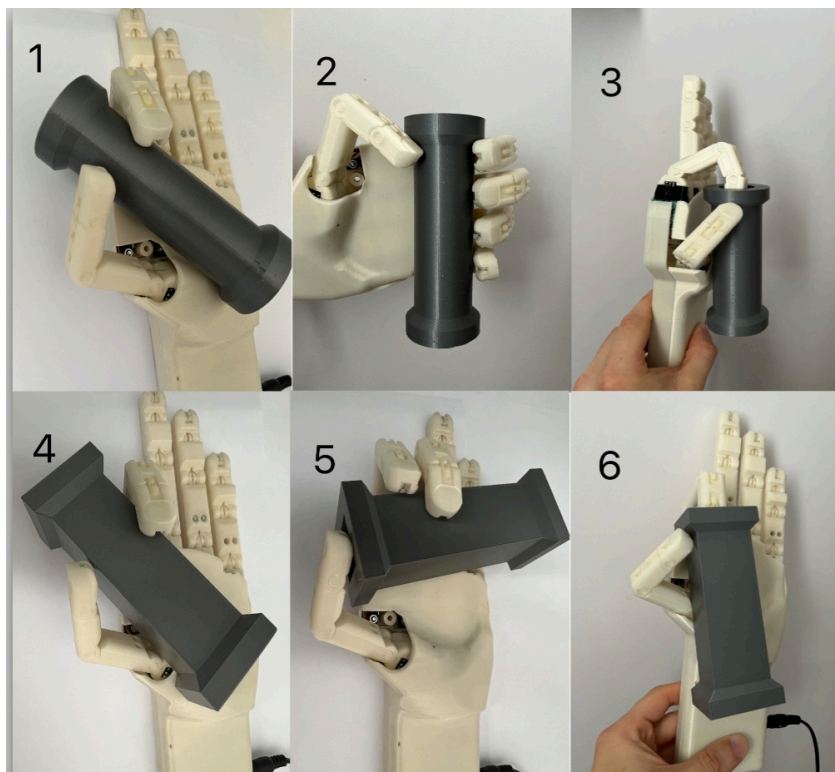
При манипулацията на цилиндрични предмети като бутилка, чаша или дръжка на врата, се налагат съвсем различни предизвикателства пред една роботизирана ръка, в сравнение със сферичните обекти. Въпреки че цилиндърът притежава две плоски повърхности (дъно и капак), захващането най-често се осъществява по извитата странична повърхност. Точното захващане зависи от правилното разпределение на силата по повърхността. Ако силата е твърде малка, предметът може да се изплъзне; ако е твърде голяма, може да се повреди или ръката да изразходва ненужна енергия. За да се оцени ефективността на захвата, са извършени функционални тестове с цилиндри с различни диаметри и тегло. Цилиндри с малък диаметър изискват по-прецизен захват, често между палеца и един или два други пръста, докато по-големите цилиндри налагат използването на всички пръсти за обгръщане. Теглото също е ключов фактор – по-тежките предмети изискват по-голяма сила на захват, която трябва да се разпредели равномерно, за да се избегне натоварване на отделни пръсти или стави.



Фигура 49. Експерименти с 3D принтирани цилиндри

При извършените функционални тестове на роботизираната ръка, резултатите показват забележителна адаптивност към различни форми и размери на обектите. Ръката демонстрира способност за успешно захващане на сфери с диаметър от 10 до 60 милиметра и цилиндри с диаметър от 10 до 40 милиметра. Това доказва гъвкавостта на нейния дизайн и ефективността на управлението, позволявайки манипулация на широк спектър от предмети. Роботизираната ръка се затруднява със захващане на сфери с диаметър 70 милиметра и цилиндри с диаметър 50 милиметра.

За по-задълбочено изследване на възможните захвати и способностите на роботизираната ръка са избрани допълнителни тестови предмети - цилиндър и правоъгълна призма. Дизайнът на фигурите е начертан на програмата AutoCAD и след това те са 3D отпечатани на принтер с отлагане на разтопен материал. Геометричните фигури имат еднаква височина от 125 милиметра като горната и долната страна са разширени с 10 милиметра, за да се избегне изплъзване и изпускане на тестовите предмети от ръката. Основата на призмата има страна с дължина 35 милиметра, докато разширената част е с дължина 45 милиметра. Вътрешната част на обектите е куха. Проведените експерименти на фигура 51 изследват способността на ръката за стабилен захват с всички пръсти и прецизен захват с два пръста (палец и показалец). Проверява се дали ръката може да задържи тестовия предмет надеждно и без да се изплъзне. Проведените експерименти показват, че ръката притежава по-стабилен захват при работа с цилиндричния предмет, тъй като пръстите лесно се адаптират около кръглия цилиндър. Захват на правоъгълната призма е възможен, но се осъществява по-трудно в сравнение с цилиндричния предмет. Видно от извършените експерименти е, че противопоставеният палец предотвратява изплъзване на геометричния обект.



Фигура 51. Експерименти с цилиндър и правоъгълна призма

Жестомимичният език предоставя добри възможности за тестване на сръчността и механичните ограничения на разработената хуманоидна роботизирана ръка. Знаците с ръце изискват изключителна прецизност, гъвкавост и фина моторика, които са ключови за всяка сложна манипулация. Американският жестомимичен език включва 26 сложни жеста, съответстващи на специфична буква от английската азбука. Всеки жест от езика е комбинация от конкретна конфигурация и разположение на пръстите и ориентация на ръката. Проведените експерименти с роботизирана ръка показват, че 20 от 26 жеста с ръка са възможни [65]. Останалите 6 жеста с ръце не могат да бъдат пресъздадени поради следните причини:

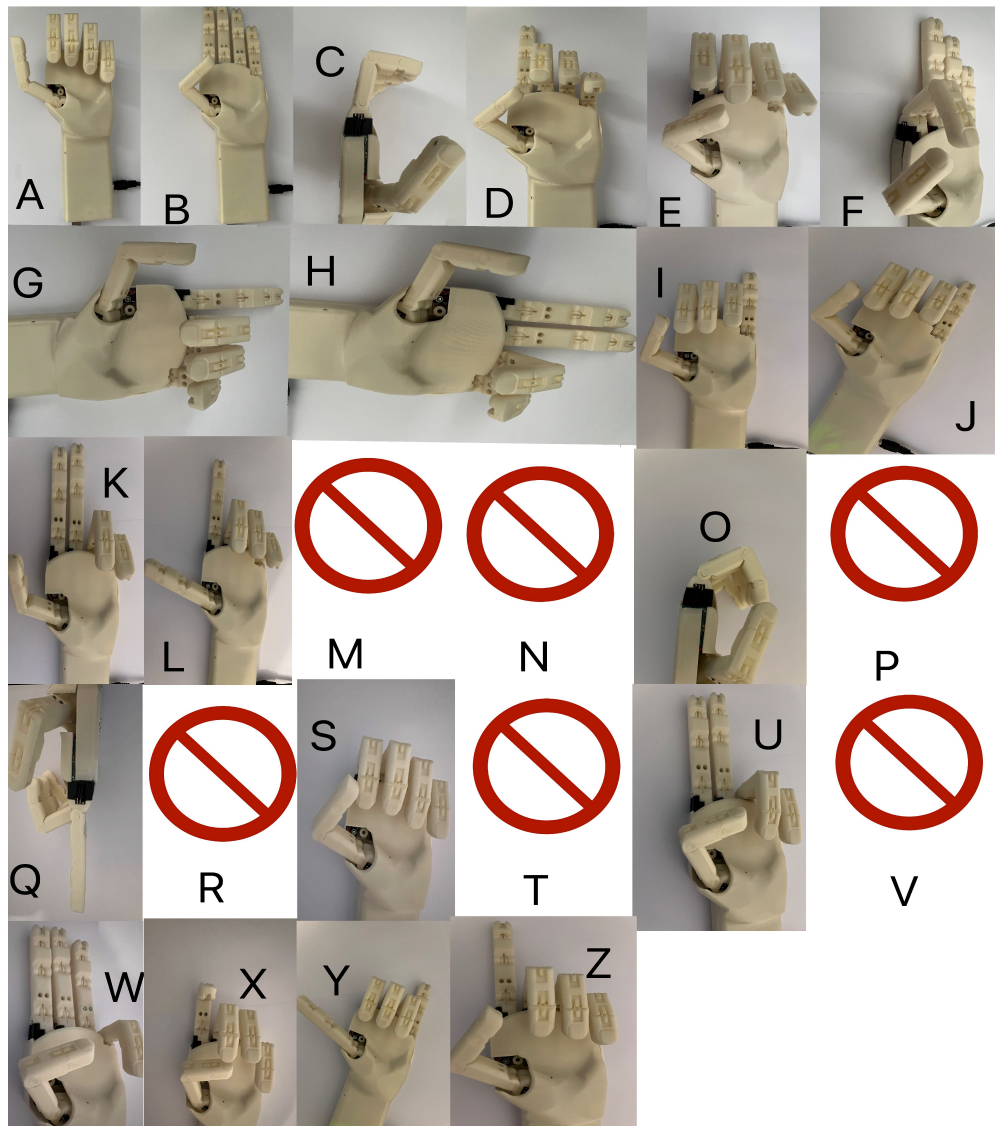
- липса на допълнителна степен на свобода за палеца (букви „М“, „N“ и „Т“)
- невъзможност за извършване на аддукционно/абдукционно движение на пръста (букви „R“ и „V“)
- пръстът не може да промени само ъгъла на ротация между метакарпалната кост и проксималната фаланга без това да се отрази и на останали ъгли (буква „P“)

Добавянето на повече двигатели, осигуряващи допълнителни степени на свобода, може да помогне с изброените проблемни жестове. В дланта на ръката има място за допълнителен двигател за палеца, увеличавайки неговата степен на свобода. Тази преработка ще направи осъществими жестове с буквите „М“, „N“ и „R“ и по този начин значително ще се намали броя на невъзможните жестове.

С термина аддукция се означава придвижване на части от тялото към средната равнина т.е. приближаването на пръстите към средния пръст на ръката. Противоположното движение на отдалечаване на пръстите от средния пръст се нарича абдукция. Текущият механичен дизайн на ръката не притежава функционалността да бъдат извършвани движенията аддукция и абдукция. Невъзможността за аддукционно/абдукционно движение на пръста може да бъде преодоляна чрез добавяне на нов двигател. Това би контролирало аддукцията/абдукцията на всички пръсти (без палеца) едновременно и би направило възможни жестове за буквите „R“ и „V“.

Последният оставащ неуспешен жест с ръка за буквата „P“ би могъл да стане възможен, ако има задвижващи механизми, контролиращи всяка от

фалангите на пръстите независимо. За това биха били необходими три двигателя на пръст. Добавянето на допълнителни двигатели за всички пръсти обаче ще направи невъзможно събирането на всички задвижващи механизми в дланта на ръката. Разработването на китка с две или три степени на свобода може да е полезно за разграничаване между буквите „I“ и „J“, защото тези жестове са идентични като втората буква изисква накланяне на ръката. Буквата „B“ е жестът с най-малко участващи пръсти - само палецът е сгънат. От друга страна най-сложните жестове, при които участват всички пръсти, са буквите „X“, „S“, „O“ и „E“.



Фигура 53. Експерименти със знаци от жестомимичен език

Заклучение

Хуманоидните роботизирани ръце отбелязват значителен напредък през последните години, вдъхновявайки се от сложността и сръчността на човешките ръце. Въпреки че изследователите са все още изправени пред редица предизвикателства, роботизираните ръце са все по-способни да изпълняват задачи, за които някога се е смятало, че са само в сферата на човешките способности. Едно от основните предизвикателства при проектирането на антропоморфни роботизирани ръце е постигане на баланс между сила, прецизност и адаптивност. Човешките ръце се справят отлично с широк спектър от задачи включващи прецизни манипулации и здрави захвати. Възпроизвеждането на тази многофункционалност в роботизирана ръка изисква внимателно анализиране и разглеждане на фактори като избор на задвижващи механизми, подходяща сензорика, алгоритми за управление и дизайн на ставите. Последните изследвания са фокусирани върху разработване на по-сложни хващачи, използващи по-точни актуатори и възползващи се от новостите в областта на сензориката и управляващи системи. Освен това интегрирането на изкуствения интелект и машинното обучение позволява на хуманоидните роботизирани ръце да се учат от опита и да подобряват работата си с течение на времето. Въпреки този напредък, все още има ограничения за настоящите роботизирани ръце. Едно значително предизвикателство е намиране на баланса между добра функционалност и евтина цена на роботизираната ръка. Добрата имитация на движенията на човешката ръка изисква използване на достатъчен брой двигатели, но в някои случаи протезите се състоят само от дланта на ръката и е необходимо актуаторите да бъдат събрани в нея. Оптимална цена на роботизираните ръце може да постигната чрез технологията 3D принтиране, която позволява експериментиране и подобряване на дизайна на ръката чрез функционални тестове. Фазата на дизайн на всеки прототип е най-важна, защото грешки в този етап водят до забавяне в целия проект и връщане в начална позиция. Въпреки това проектирането и разработването на роботизирана ръка е итеративен процес, изискващ непрекъснато подобрене и оптимизиране, базирано на тестове и експерименти. Изучаването на анатомията и биомеханиката на човешката ръка предоставя решаващи прозрения за проектиране на ефективни и функционални роботизирани прототипи.

Перспективи за развитие

Развитието на 3D принтираната хуманоидна ръка е с големи перспективи и в бъдеще могат да бъдат следните подобрения:

1. Добавянето на допълнителен двигател специално за палеца на роботизираната ръка би довело до значителни подобрения в нейната функционалност, способност за захващане и извършване на жестове. Палецът в човешката ръка е отговорен за около 40% от сръчността при захващане [59]. С допълнителен, отделен двигател, палецът би могъл да се движи по-независимо и прецизно, което е от ключово значение за изпълнение на сложни задачи.

2. Бъдещите модели могат да бъдат интегрирани с допълнителни сензори като тактилни, температурни, за натиск, както и с по-сложни алгоритми за управление. Това ще даде на ръцете способност да "усещат" околната среда и да взимат автономни решения, подобрявайки своята сръчност и приложимост.

3. Технологиата 3D принтиране позволява изработката на персонализирани протези с много по-ниска цена от традиционните. В бъдеще биха могли да бъдат изработени роботизирани ръце, които да бъдат проектирани спрямо индивидуалните нужди и анатомия на всеки потребител. Също така, могат да проучени нови материали за 3D печат, които са по-здрави, по-гъвкави и по-леки. Върху повърхността на ръката може да бъде добавен нов слой имитиращ естествената човешка кожа по подобие на [60], което би било важно в случая на протеза.

Приноси на дисертацията

Взимайки предвид работата по дисертацията и резултатите получени от проведените изследвания и представени в дисертационния труд, мога да се формулират следните приноси:

Научно-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 жестовите.

Публикации към дисертацията

- III.* Ivan Chavdarov, **Ivaylo Georgiev**, Lyubomira Miteva, Roumen Trifonov, and Galya Pavlova. 2021. Analysis of the kinematic characteristics of a 3D printed finger of robotic humanoid hand. In Proceedings of the 22nd International Conference on Computer Systems and Technologies (CompSysTech '21). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 145–150. <https://doi.org/10.1145/3472410.3472434>

- II2.* V. Nikolov, **I. Georgiev** and I. Chavdarov, "Hardware and software of a 3D printed humanoid hand," *2023 XXXII International Scientific Conference Electronics (ET)*, Sozopol, Bulgaria, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ET59121.2023.10278809.

- II3.* Chavdarov, **I. Georgiev**, B. Naydenov and V. Nikolov, "Design of a 3D Printed Humanoid Robotic Hand," *2023 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, Split, Croatia, 2023, pp. 1-6, doi: 10.23919/SoftCOM58365.2023.10271644.

- II4.* I. Chavdarov, B. Naydenov, V. Nikolov and **I. Georgiev**, "Modular Design, Communication and Control Systems of a 3D-printed Humanoid Robotic Hand," in *Journal of Communications Software and Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 146-156, March 2024, doi: <https://doi.org/10.24138/jcomss-2023-0168>

- II5.* **I. Georgiev**, V. Nikolov, I. Chavdarov and B. Naydenov, "Grasp planning and sign language gestures with 3D printed humanoid hand," *2024 XXXIII International Scientific Conference Electronics (ET)*, Sozopol, Bulgaria, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/ET63133.2024.10721540.

Summary

This summary outlines a project focused on the design and management of a humanoid, 3D-printed robotic hand. The project combines principles from mechanical engineering, robotics, and additive manufacturing to create a functional and cost-effective prototype. The design process begins with conceptualizing the hand's structure, aiming to replicate the dexterity and range of motion of a human hand. This involves using CAD (Computer-Aided Design) software to model the hand's components, including the palm, fingers, and joints. The material choice is crucial, with PLA (polylactic acid) being a common option for 3D printing due to its strength and printability. Once the digital design is finalized, the components are fabricated using 3D printing technology. This method is selected for its ability to produce complex geometries quickly and affordably, allowing for rapid prototyping and iteration. An innovative idea described in the dissertation is that the fingers are 3D printed assembled through a combination of factors such as: placement and orientation of the finger on the 3D printer's build platform; the shape of the joints; the space between the finger joints; the printing processes. The main hardware components that make up the modular finger are a potentiometer, a DC motor, a motor driver, a microcontroller, and an I2C communication module. A command to move the finger is sent from the computer through the communication module. The message is transmitted via I2C protocol to the microcontroller for the corresponding finger. The microcontroller processes the received request and sends a signal to the motor driver to perform the movement. The potentiometer serves as a feedback loop for the exact positioning of the finger. Several programs are created to control the fingers of the hand. One of the developed programs reproduces gestures from the American sign language. A number of experiments are performed to confirm the functionality of the hand. These experiments include grasping specially designed 3D printed objects such as prisms, spheres, and cylinders; grasping objects such as cardboard coffee cup, working tools; reproduction of sign language gestures.