



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Машиностроителен Факултет
катедра „Автоматизация на дискретното производство“

маг. инж. **СТАНИСЛАВ ТОШКОВ ЦОЛОВ**

**ПРОЕКТИРАНЕ НА СПЕЦИАЛИЗИРАНИ РОБОТИ С ПАРАЛЕЛНА
КИНЕМАТИКА**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление 5.1 Машинно инженерство
Научна специалност: Автоматизация на производството

Научни ръководители: **доц. д-р инж. Ренета Красиминова Димитрова**
доц. д-р инж. Стилиян Николов Николов

СОФИЯ, 2024 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Автоматизация на дискретното производство“ към Машиностроителен факултет на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 17.06.2024 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 19.09.2024 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.1-70/26.06.2024 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

Вътрешни за ТУ-София:

1. проф. д-р инж. Иво Кръстев Малаков, 5.1 Машинно инженерство
2. проф. д-р инж. Панчо Кръстев Томов, 5.1 Машинно инженерство

Резервен член:

3. доц. д-р инж. Велизар Ангелов Василев, 5.1 Машинно инженерство

Външни за ТУ-София:

4. проф. д-р инж. Димитър Дамянов Дамяновски, 5.1 Машинно инженерство
5. доц. д-р инж. Иван Маринов Амуджев, 5.1 Машинно инженерство
6. доц. д-р инж. Иванка Василева Пеева, 5.1 Машинно инженерство

Резервен член:

7. проф. д-р инж. Димитър Андонов Дичев, 5.1 Машинно инженерство

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Иво Кръстев Малаков, 5.1 Машинно инженерство
2. проф. д-р инж. Димитър Дамянов Дамяновски, 5.1 Машинно инженерство

Материалите по защитата са на разположение на интересующите се в канцеларията на Машиностроителен факултет на ТУ-София, блок №3, кабинет № 3242.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Автоматизация на дискретното производство“ на Машиностроителен факултет.

Автор: маг. инж. Станислав Цолов

Заглавие: Проектиране на специализирани работи с паралелна кинематика

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Засегнатата проблематика е актуална, свързана с проектиране и анализ на специализирани работи с паралелна кинематика, с цел разработване на унифицирана методика за тяхното проектиране., която да служи като ръководство за проектирания на подобни специализирани работи.

Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е анализ на работите с паралелна кинематика и разработване на унифицирана методика за тяхното проектиране..

За постигане на целта се предвижда да се решат следните основни задачи:

- Разработване на класификация на съществуващите работи с паралелна кинематика.
- Разработване на методика за проектиране на работи с паралелна кинематика.
- Анализ на трудностите, свързани с проектирането на работи с паралелна кинематика.
- Прилагане на разработената методика при конструиране на специализиран робот с паралелна кинематика
- Оценка и анализ на получените резултати.

Научна новост

- Разработена е класификация на съществуващите работи с паралелна кинематика, като основна характеристика е влиянието на кинематиката и конструкцията на робота, върху степените на свобода на крайното изпълнително звено.
- Разработена е методика за проектиране на работи с паралелна кинематика, включваща десет етапа със съответните взаимовръзки между тях.
- Създадена е конструкция на принципно нов ориентиращ модул за специализиран робот с паралелна кинематика.

Практическа приложимост

- Разгледани и анализирани са работите с паралелна кинематика, с техните предимства, недостатъци, трудности и проблеми при проектиране.
- Разработената методика е валидирана чрез проектиране на специализиран робот с паралелна кинематика с допълнителен ориентиращ модул.
- Създаден е прототип на проектирания специализиран робот с паралелна кинематика, като е разработено програмно управление, електрическа схема и техническа документация.
- Извършени са експериментални изследвания, като са анализирани получените резултати.
- Резултатите от разработването на дисертационния труд могат да се приложат, както за реални изследвания и демонстрация в учебния процес, така и за проектиране на работи с паралелна кинематика в различни производствени процеси.

Апробация

Апробирана е разработената методика за проектиране на работи с паралелна кинематика, включваща десет етапа със съответните взаимовръзки между тях, като е създаден прототип на паралелен делта робот с ориентиращ модул.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 13 на брой научни публикации, 4 от които реферирани в Scopus, 3 в индексирани списания, едно от които с ранг Q2. От 13 публикации, 2 са самостоятелни, а останалите в съавторство.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **169** страници, като включва увод, 6 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. В приложение от **42** страници са представени техническите чертежи, електрическата схема и управляващата програма на разработения прототип на паралелен делта робот. Цитирани са общо **115** литературни източници, като **94** са на латиница и **11** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо **156** фигури и **14** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава 1 - ОБЗОР И АНАЛИЗ НА КОНСТРУКЦИЯТА НА СЪВРЕМЕННИТЕ РОБОТИ С ПАРАЛЕЛНА КИНЕМАТИКА

1.1. Роботи с последователна кинематика

Този тип работи са с антропоморфна структура наподобяваща човешка ръка. По настоящем тези работи намират широко приложение в индустрията и са едни от най-масово използваните манипулатори. Структурата им е съставена от звена свързани непосредствено едно след друго посредством кинематични двоици от 5-ти клас (със една степен на свобода), най-често ротационна (R) или транслационна (T). Такъв тип работи могат да бъдат наречени серийни (последователни) (1) заимствано от последователни свързаните звена изграждащи структурата им. Най-разпространените примери на работи с последователна архитектура са шарнирните работи, декартовите работи и “SCARA” роботите фиг. 1.1.

Роботите с паралелна кинематика, за които броят на кинематичните вериги е строго равен на броя на СНС на крайния ефектор се наричат напълно паралелни роботи. Този тип механизми представляват голям интерес за индустрията, тъй като предлагат следните характеристики: минимум две вериги позволяват да разпределим натоварването върху тях, броят на актуаторите за постигането на необходимите СНС е минимален, броят на необходимите сензори за контрол с обратна връзка е минимален, от гледна точка на безопасността, когато актуаторите са блокирани роботът запазва положението си.

1.3. Произход на роботите с паралелна кинематика

Създаването на делта роботът е подтикнато от посещение, направено от проф. Клавел и неговия екип, в фабрика за шоколадови изделия. Там, с цел поставянето на шоколадови бонбони в опаковъчни кутии, е бил необходим високоскоростен механизъм с 3 трансляционни и една ротационна С.Н.С, изпълняващ 3 операции за секунда. Така опитвайки се да решат тази задача, проф. Клавел и неговият екип, достигат до конструкция на паралелен робот фиг.1.12 съставена от две платформи подвижна и неподвижна свързани помежду си посредством 3 единични кинематични вериги разположени симетрично под 120 [°] между тях. Ключов момент, в концепция на делта робота, е използването на паралелограмите механизми, които ограничават движението на крайната подвижна платформа до чиста трансляция, т.е. само движение в посока X, Y и Z без ротации. Така двете платформи са винаги успоредни една на друга. По този начин драстично се опростява управлението на робота.

1.4. Съществуващи класификации на роботите с паралелна кинематика

Реализацията на структурите на роботите с паралелна кинематика зависи най-вече от изобретателността, находчивостта и творческите възможности на конструктора. За разлика от роботите с класическа архитектура, където се прилагат систематични подходи (синтез [104]) за проектирането им. Това е предпоставка за наличието на изключително голямо разнообразие структури със затворена кинематика, чиято конструкция при някои работи се различават съществено едни от други, а при други не чак толкова, но достатъчно, че да повлияе значително върху параметрите на робота.

1.4.1. Роботи предназначени за симулатори

След предложението на Стюарт са налице редица разработки на летателни симулатори. В този сектор е един от най-успешните за паралелните механизми, като освен за летателни много компании създават симулатори за кораби, влакове и камиони. Типични представители на тази група работи са симулаторът на Еърбъс А340 фиг.1.14, както и най-големия съществуващ симулатор в Университет на Айова фиг.1.15.

1.4.2. Позициониращи работи

Благодарение на доброто съотношение на полезна товароносимост към теглото на робота, паралелните механизми често биват използвани като позициониращи системи. Пример за такъв робот е системата за насочване на антени предложена от Кентърбърийския университет фиг. 1.19.

1.4.3. Фино позициониращи работи

Предимствата на паралелните работи свързани с тяхната точност на позициониране, разпределение на товара, коравина на механиката и възможност конструкцията да позволява малки и прецизни ходове на К.И.З при сравнително големи ходове на актуаторите, ги прави идеални за фино позициониращи системи.

Представители на тази група работи са: системата „Paros“ фиг.1.22 с работно пространство 350×350×80 [mm] и точност на позициониране ± 5 [μm], роботът HR1 фиг.1.22 на „Alio Industries“ с работно пространство 100×100×20 [mm] и точност ± 1 [μm].

1.4.4. Вибродемпфериращи паралелни механизми

Възможната висока честотна лента на паралелните механизми ги прави добри кандидати за гасене на вибрации, под формата на активни демпфериращи системи (активно окачване). Примери за такива работи са демпфериращия механизъм на Университета в Уайоминг използващ соленоиди от мегафон за актуатори, както и хексаподът „MicroMega“ фиг.1.25.

1.4.5. Металообработващи паралелни механизми

Първата такава разработка е на компанията „Giddings & Levis“, през 1994 под името „Variax“ фиг.1.27. Конструкцията е основана на платформа на Гоф. Според неговия производител, въпреки факта, че машината притежава 6 С.Н.С (при необходими максимум 5 за обработваща машина), тя е с 5 пъти по-добра коравина от класическите машини за обработка.

1.4.6. Високоскоростно сортиране, пакетиране

В тази група попада най-разпространения паралелен манипулатор – делта роботът. Със своята проста и лесна за управление конструкция, изискваща минимално количество сензори и актуатори, позволяваща високи скорости и ускорения благодарение на олекотените кинематични вериги и всичко това на достъпна цена. Това ги прави изключително подходящи да бъдат използвани, като системи за сортиране/пакетиране вградени директно в производствената линия. Почти няма компания за индустриални работи или пакетиращи системи, която да не предлага в своята продуктова гама делта робот. Типичен пример за такъв е „IRB 365“ на фирма АББ фиг.1.31, с 5 С.Н.С и впечатляваща възможност от 120 цикъла в минута.

1.4.7. Медицински цели

Примери за такива работи са: делта роботът „SurgiScore“ фиг.1.33, служещ за позициониране на микроскоп върху пациент; роботът „MBARS“ фиг.1.33, закрепван към тялото на пациент и служещ за подвеждане на винтове при ендопротезиране на колянна става; роботът „MARS“ фиг.1.34, с подобни на предходния функции, но при операции на гръбначния стълб.

1.4.8. Роботи за товароподемни цели

Използването на въжени паралелни роботи за товароподемни цели е за първи път предложено от Албус заедно със своя екип от Националния Институт за Стандарти и Технологии, с цел създаването на роботизирания кран „Robocrane“ фиг.1.35. Той позволява контрол както на транслагацията, така и на ротацията, което е необичайна характеристика за кранове като цяло. Целта на робота е да бъде използван за товарене и разтоварване на кораби, ремонтване на кораби, управление на отпадъците и др. Друг типичен пример е представен от „August Design Inc.“, които предлагат системата „AACTS“ за автоматизирано товарене на кораби.

1.4.9. Паралелни механизми използвани като тензометрични сензори

Роботът на „INRIA“ фиг.1.36 е създаден да бъде сензор за сили и моменти, позволяващ измервания на вертикални сили с точност от 0.15[N] и хоризонтални с точност 0.03 [N]. Тази анизотропия в точността на измерване произтича от геометрията на робота.

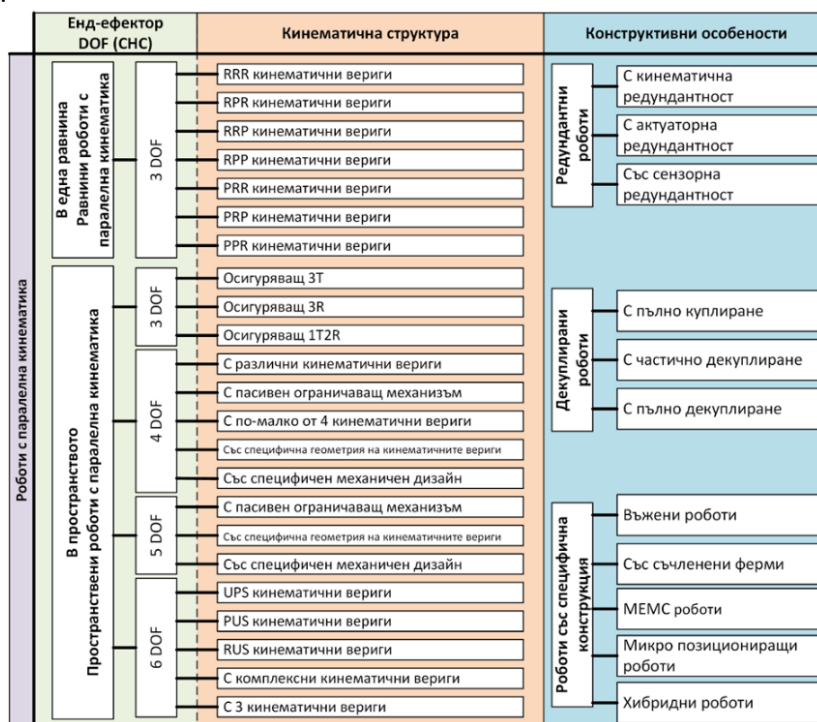
1.5. Изводи

От направения по горе обзор могат да се направят следните изводи:

- Предимствата на паралелните механизми пред последователните е основна причина за високия интерес на изследователите, още от ранните етапи на развитие на съвременната механика.
- Проектирането на такива механизми се ослани не толкова до системен подход, колкото на творческия замисъл и въображението на конструктора и е причината за наличието на големия брой механизми от този тип различаващи се съществено един от друг. Това е и основна причина за трудното класифициране на този вид работи.
- Роботите с паралелна кинематика намират изключително голям спектър на приложение, по-голям дори от този на роботите с последователна кинематика.
- Проектантите, притиснати от срокове, предпочитат използването на прости типизирани и генерализирани механизми, но с развитието на САЕ системите, материалите, сензориката и системите за управление паралелните механизми имат потенциала да бъдат в основата на бъдещата роботика.

Глава 2 - КЛАСИФИКАЦИЯ НА РОБОТИ С ПАРАЛЕЛНА КИНЕМАТИКА.

В тази глава са разгледани най-разпространените работи с паралелна кинематика, като е предложена класификация фиг.2.1. Както стана ясно в т.1.5, изборът на релевантен показател за класифициране, обхващащ цялото многообразие работи с паралелна кинематика е нещо сравнително сложно. Това е и причината да не са известни много разработени класификации. В предложената класификация като основна класифицираща характеристика е приета влиянието на кинематиката и конструкцията на робота, върху С.Н.С на крайното изпълнително звено. Генерализирани показатели, чиито характер е основен и с еднаква тежест за всички паралелни работи.



Фиг.2.1. Класификация на работи с паралелна кинематика

Признаците, по които се извършва класификацията са:

2.1. С.Н.С на крайното изпълнително звено на робота

Този признак разделя роботите с паралелна кинематика в зависимост от броя на С.Н.С, които те могат да осигурят на крайното изпълнително звено. Това е определящо за областта на използване на робота.

2.2. Кинематичната структура на робота

Този признак разделя роботите с паралелна кинематика в зависимост от топологията на кинематичната им структурата. Той разглежда структурата (връзките от които са изградени) на кинематичните вериги, изграждащи кинематичната структурата на робота и връзките между тях. Тъй като броя на С.Н.С на крайното изпълнително звено, влияе пряко върху кинематичната структура, различните типове работи според този критерий са групирани с отчитане на С.Н.С на крайното изпълнително звено.

2.3. Конструктивни особености

Този признак разделя роботите с паралелна кинематика в зависимост от особености на техните конструкции.

2.4. Изводи

След разглеждането на представените работи, става ясно, че самата реализацията на конструкцията при паралелните работи влияе значително върху тяхната производителност. В предложената класификация, могат да се направят следните основни изводи:

- Основна класифицираща характеристика е влиянието на кинематиката и конструкцията на робота, върху С.Н.С на крайното изпълнително звено.
- Има възможност за лесно онагледяване на параметрите на различните типове съществуващи конструкции.
- Множеството на реализираните типове конструкции е сравнително голямо, а предложената класификация позволява лесно да бъде избрана конструкция отговаряща на определени параметри по задание, както и да даде първоначална насока за реализацията на конструкцията при проектирането на работи с паралелна кинематика.

Глава 3 - РАЗРАБОТВАНЕ НА МЕТОДИКА ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА РОБОТИ С ПАРАЛЕЛНА КИНЕМАТИКА.

Процесът на проектиране на работи е свързан с използването на алгоритми за анализ на тяхната структура, кинематика, динамика, статика и сингулярност. Наличието на голямо разнообразие на алгоритми за анализ на роботите с паралелна кинематика е породено от високия интерес към тях, вследствие на предимствата им спрямо роботите с последователна структура. Например ако се цели създаването на робот за металообработка, то е подходящо да се използва по-комплексен и прецизен алгоритъм за статичния анализ, тъй като точността на обработката зависи до голяма степен от коравината на конструкцията.

За осигуряване на системен подход при проектиране на работи с паралелна кинематика е разработена методика, показана на фиг.3.1. Основните етапи на предлаганата методика са:

3.1. Етап 1 - Анализ на проектното задание

Добре дефинираното задание може значително да намали времето и средствата отделени за конструиране. То може да спести трудности на конструктора за постигане на ненужни параметри и функционалности. Доброто задание включва подробна дефиниция на всеки параметър.

3.2. Етап 2 - Структурен анализ и синтез

В този етап се генерират всички възможните структури на робота спрямо желаните степени на свобода. От тях се избира най-подходящата, за целите, преследвани с проектирането на робота. Ключов проблем при роботите с паралелна кинематика е голямото разнообразие от възможни структури, за разлика от роботите с последователна кинематика, където броят на тези структури е ограничен. Характерна черта на роботите с паралелна кинематика е, че тяхната производителност се влияе значително от тяхната структура.

3.3. Етап 3 - Размерен анализ и синтез

Определянето на размерите е един от най-важните етапи при проектирането на роботите с паралелна кинематика, тъй като неговата производителност до голяма степен зависи от тях [72]. Като се има предвид, че броят на конструктивните параметри при роботите с паралелна кинематика е голям, синтезът на размерите може да бъде изключително комплексен.

3.4. Етап 4 - Кинематичен анализ

Кинематичния анализ включва:

- **Решаване на права кинематична задача**

Правата кинематична задача, се състои в намирането на положението на end-effector - X (p_x, Ψ) спрямо координатната система на робота, при зададени минимален брой координати на кинематични стави от кинематичните вериги на робота, като това най-често са задвижваните стави, тъй като на тях е най-лесно да бъдат поставени сензори отчитащи преместване - линейно или ротационно.

- **Решаване на обратна кинематична задача**

Обратната кинематична задача се състои в намирането на координатите на ставите на робота q спрямо X , където q е генерализиран параметър съдържащ променливите на всички стави, а $X = (x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \gamma)^T$, е генерализиран параметър за положение на end-effector спрямо координатната система робота.

- **Анализ на скоростите и ускоренията**

Този анализ показва какви са ускоренията на звената на робота, необходими за постигане на зададени скорости на end-effector. Този анализ се основава в намирането на обратната кинематична матрица на Якоб J_k за дадения механизъм, която е в основата на зависимостта между скоростите на кинематичните стави и скоростта на end-effector.



Фиг. 3.1. Методиката за проектиране на работи с паралелна кинематика

3.3. Етап 5 - Анализ на сингулярности

Сингулярните конфигурации са пози на робота при които се губи коравина и се появяват нежелани неконтролируеми степени на свобода на end-effector. Кинематичните сингулярности се проявява при пози на робота, в които се губи стабилност на end-effector, свързано с поява на нежелани неконтролируеми степени на свобода, реализирани под формата на наличие на скорости при спрени актуатори и обратното. Анализът на сингулярност се основава в намирането на детерминантата на пълната обратна кинематична матрица на Якоб J_k , след което трябва да се намерят позите и конфигурациите на механизма които нулират детерминантата, т.е. позите в които роботът изпада в сингулярност [87]. При необходимост, в този анализ може да се определят типът и броят на допълнителните DOF придобити от механизма изпаднал в сингулярност, чрез намиране на собствените вектори свързани с нулевите собствени вектори на пълната обратна матрица на Якоб. Възможно е също създаването на индекси за дадени пози в зависимост от това, колко близо се намират до сингулярност.

На този етап от методиката е изключително важно да се провери дали в желаното работно пространство на робота има налични сингулярности. Сравнянето с откритите сингулярностите се осъществява по един от следните начини:

- промяна на геометрията и размерите на звената;
- добавяне на допълнителни задвижвани кинематични вериги които не повишават DOF на робота, а се задействат само при сингулярни пози, за да бъдат изключени тези пози;
- изключване на сингулярните пози когато са по периферията на работното пространство, метод който значително намалява работното пространство, тогава при необходимост да се спази зададеното работно пространство се променят геометричните параметри отговорни за него;
- коригиране на траектории минаващи през сингулярни позиции посредством алгоритми дефинирани в управляващия софтуер.

3.6. Етап 6 - Статичен анализ

Статичния анализ дава зависимост между силите действащи върху end-effector и силите в кинематичните стави за дадена поза на робота, без да се отчитат гравитационните, инерционните и кориолисовите сили. При проектирането на работи с паралелна кинематика, намирането на максималните сили действащи в ставите на робота, спрямо зададено натоварване на end-effector, е от изключително значение за оразмеряването на актуаторите и лагуването на звената на робота. В зависимост от приложението на робота, важността на статичния анализ варира.

3.7. Етап 7 - Динамичен анализ

Този анализ дава зависимостта между скоростта, ускорението и траекторията на end-effector и задвижващите сили на двигателите. Така могат да бъдат разграничени две задачи касаещи динамиката на робота – права и обратна. Правата динамична задача се състои в определяна на скоростта, ускорението и траекторията на end-effector, при зададени двигателни усилия, действащи от актуаторите на робота.

3.8. Етап 8 - Проектиране на структурни единици

На този етап след като са известни силите действащи върху звената се пристъпва към тяхното проектиране. В зависимост от структурата на робота са възможни различни подходи при конструирането на елементите. Преди започване на проектирането е подходящо да се направи анализ на това как конструкцията на отделните елементи се влияят едни от други. Трябва да се прецени от кои елементи да се започне проектирането. Например електро двигателите трябва да са избрани преди да се конструира предавателния механизъм. Добра практика е системата да се раздели на отделни независими модули, които могат да бъдат проектирани едновременно. Намирането на позите на робота с максимални сили действащи върху ставите му в дадено работно пространство се извършва чрез сегментиране на работното пространство и изследването всеки един от сегментите до намирането на стойности който са екстремуми на силите.

3.9. Етап 9 - Създаване на управляващ софтуер

На този етап посредством програмни езици се създава софтуерът, описващ алгоритъма за управление на робота. Повечето от разработките свързани с контрола на позицията при работи с паралелна кинематика са разделени на две групи: контрол с локална обратна връзка и контрол основан на динамичния модел на робота. Контролът основан на динамичния модел на робота, е с редица предимства пред класическото ПИД кинематично управление, но е труден за реализация поради високата чувствителност на управлението на робота към неточности в съставения динамичен модел. В повечето случаи при роботите с паралелна кинематика, се използва ПИД управление, а динамичния модел се използва за оптимизиране на натоварването на двигателите, тяхната плавност на движение. Алгоритъмът за съставяне на динамичен модел е заимстван от роботите с последователна кинематика. Разработването на управляващия софтуер включва решаването на редица задачи като: разработване на алгоритми за управление на актуатори, разработване на алгоритми за калибриране, разработване на алгоритми за генериране на траектории избягващи сингулярни пози, разработване на алгоритми за интерполация, осигуряващи движението на end-effector по определена траектория, създаване на потребителски интерфейс и др.

3.10. Етап 10 - Валидация и внедряване на проектирания робот

На този етап след като е създаден прототип на робота и управляващ софтуер се извършват изследвания целящи проверка на съответствието на възможностите на създадения робота със заложените в заданието параметри. Контролират се работна зона, товароносимост, максимални скорости, наличие на сингулярности, коравина, както и функционалността на управляващия софтуер. След успешно преминаване на проверките за съответствие, роботът предвиден за комерсиални цели, се интегрира в производствена система за изпълнение на конкретни задачи. Това включва монтаж и програмиране на робота според спецификите задачи, който той ще изпълнява.

3.11. Изводи

След разработване на предложената методика за проектиране на работи с паралелна кинематика, могат да се направят следните изводи:

- Съществуващите алгоритми са сравнително сложни и трудоемки, като това е породено от сложната архитектура характерна за този тип работи.
- Изборът, с кои алгоритми да се подходи в процеса на проектиране, зависи най-вече от целите за които ще бъде създаден роботът.
- Различните алгоритми дават различен по точност и качество резултат спрямо входните параметри.

ГЛАВА 4 - ТРУДНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРАНЕ НА РОБОТИ С ПАРАЛЕЛНА КИНЕМАТИКА

4.1. Трудности при структурния синтез

Структурния синтез на роботите с паралелна кинематика се осъществява с входни параметри за желаните С.Н.С, които трябва да изпълнява end-effector на робота. Роботи с паралелна кинематика с 6 С.Н.С, изградени чрез еднакви кинематични вериги притежават изключителна стабилност. При тях липсват паразитни движения, но в практиката често се изисква използването на работи с по-малко DOF.

4.2. Трудности при размерния синтез

При размерния синтез на звената, на роботите с паралелна кинематика като входен параметър най-често се използва желаното работно пространство на робота. Основните проблеми характерни за почти всички роботите с паралелна кинематика са ограниченото им работно пространство и ограничената възможност за ориентация на К.И.З, намаляваща драстично в периферията на работното пространство. Причините за това са най-често следните:

- поява на колизии в крайните точки на работното пространство, поради наличие на голям брой кинематични вериги;
- изпадане в сингулярност на робота в периферията на работната зона и в крайните ъгли на възможна ориентация на К.И.З (положение в което той губи стабилност);
- ограничен ход на сферичните съединения в кинематичните вериги.

4.3. Трудности при кинематичния анализ и управление на робота

Сложната конструкция на роботите с паралелна кинематика е причина за усложнения кинематичен анализ и по-точно решаването на правата кинематична задача, която е от съществено значение за управлението на робота.

Чрез нейното решаване системата за управление, знае къде се намира end-effector на робота във всеки един момент. Решенията на правата кинематична задача, при някои работи с паралелна кинематика могат да достигнат до 40. За намиране на правилното решение се налага използване на специфични числени методи, чиято имплементация, в управляващата система се прави строго индивидуално за конкретния робот. В резултат на това се наблюдават следните проблеми:

- усложняване на управляващия софтуер;
- забавяне на работата на робота;
- необходимост от увеличен изчислителен капацитет на управляващия контролер;
- грешки в позиционирането на робота, поради влияние на извършваните закръгления върху точността на резултатите, при някои от използваните за решаване на правата кинематична задача, числени методи.

4.4. Трудности, свързани със сингулярностите

При роботите с последователна кинематика са възможни единствено кинематични сингулярности, които лесно могат да бъдат неутрализираны, чрез релативно препозициониране на някои от първите звена (1-ва, 2-ра, 3-та и 4-та ос на робота) спрямо неподвижен К.И.З. фиг.4.5. При чисто трансляционно движение на К.И.З. на робота се достига позиция на сингулярност и трансляционното движение не може да продължи без препозициониране на част от звената, в случая 1-ва ос. При роботите с паралелна кинематика, освен кинематични, се наблюдават и сингулярности касаещи статиката и динамиката на робота, както и факта, че кинематичните вериги са паралелно свързани, води до следните проблеми:

- избягването на кинематична сингулярност е невъзможно чрез препозициониране (както при работи с последователна кинематика), тъй като всички кинематични вериги са свързани заедно;
- увеличаване на напреженията в елементите на кинематичните вериги на робота, което може да доведе до тяхното разрушаване, тъй като актуаторите в кинематичните веригите, могат да действат един срещу друг;
- в сингулярните зони в някои случаи се наблюдава промяна на предавателното отношение на задвижващия механизъм, което може да доведе до неточности в позиционирането и стабилността на К.И.З.

4.5. Трудности, свързани с работното пространство

Представянето на работното пространство на роботите с паралелна кинематика, се сблъска със следните проблеми:

- възможните ъгли на ориентация на end-effector зависят от неговото положение в работната зона;
- представянето на работното пространство на работи с повече от 3 трансляционни С.Н.С. с всичките възможни ориентации на end-effector е почти невъзможно;
- анализът на работното пространство и намирането на неговата големина, се основава на използване на интервални числени методи, реализирани строго специфично за конкретния робот.

4.6. Трудности, свързани с използваните компоненти на кинематичните вериги

Като се изключат ротационните и трансляционните съединения, между звената на кинематичните вериги, роботите с паралелна кинематика залагат изключително много на шарнири на Хук и сферични накрайници. Важен параметър на последните две е ъгълът на отместване който позволяват, като този параметър влияе значително върху възможностите на робота, от гледна точка на работно пространство. Колкото по-малък е възможният ъгъл на отместване, толкова по-ограничено е работното пространство и обратно. За съжаление повечето стандартни съединения от този тип са с малки ъгли на отместване. Това принуждава повечето производители на паралелни работи сами да проектират лагериращите звена, с цел максимално оптимизиране на този ъгъл.

4.7. Изводи

От направените анализи, могат да се направят следните изводи:

- Дефинирани са основните групи трудности, възникващи на различни етапи от процеса на проектиране на роботите с паралелна кинематика.
- Разгледани са трудности, характерни за всяка една от дефинираните групи и са посочени методите за решаване на тези проблеми, прилагани от различни производители на роботите с паралелна кинематика, намерили индустриално приложение.
- Въз основа на дефинираните проблеми при проектиране на работи с паралелна кинематика и обзора на използваните в момента в индустрията, работи с паралелна кинематика, като най-удачни за използване се оказват Делта работи с 3 трансляционни С.Н.С., като при необходимост дават възможност за добавяне на ориентиращ модул към подвижната платформа фиг.4.12, осигуряващ допълнителни 3 С.Н.С. за ориентиране на К.И.З.
- Тази конструкция на Делта робот с добавен ориентиращ модул, съчетава предимствата на индустриалните работи с последователна и паралелна кинематика, при значително опростяване на процес на проектиране.
- Това е предпоставка за все по-широко навлизане на Делта роботите в индустрията.

ГЛАВА 5 - РАЗРАБОТВАНЕ НА ДЕЛТА РОБОТ С ИНТЕГРИРАН ОРИЕНТИРАЩ МОДУЛ

С цел валидация на разработената в глава 3 методика ще бъде разработена конструкция на делта робот с интегриран ориентиращ модул. Избран е такъв робот тъй като е със сравнително проста конструкция, която не изисква сложни алгоритми при проектирането му, а както беше изложено в предходните глави, при конструирането на някои типове паралелни механизми, се налага използването на комплексни алгоритми за анализ, за които може да се каже, че сами по себе си могат да достигнат обем на цялостен дисертационен труд. Чрез така направения избор на робот за проектиране, разработката може да се фокусира върху методиката, без да се налага задълбочаване в сложени алгоритми за анализ, които както вече беше изложено са присъщи за някои типове паралелни роботи. Освен това, голяма част от методите за анализ при делта роботите могат да бъдат реализирани чрез симулиране в среда за компютърно моделиране в случая SolidWorks. За целта ще се създаде опростен модел на робота с който да се извършат необходимите изследвания. Използването на опростен модел е необходимо, тъй като средата за моделиране не се справя добре с наличието на много връзки между детайлите, особено когато се изследват затворени кинематични вериги. Това може да доведе до забавяне на процеса по анализ и дори до съществени грешки. Използването на опростени модели прави процеса значително по-бърз и гъвкав. По този начин лесно могат да бъдат намерени силите действащи върху всеки един от компонентите на механизма, а след като бъдат проектирани с техните реални конструкции, всеки един от тях поотделно може да бъде проверен, като бъде подложен на даденото натоварване, намерено от анализа на опростения модел. Конструкцията на робота, който ще бъде проектиран, е съставена от две платформи, подвижна и неподвижна, свързани помежду си посредством 3 единични кинематични вериги. Върху подвижната платформа, която се явява К.И.З на робота, е поставен ориентиращия модул. Размерите на платформите велият пряко върху производителността на робота, затова е удачно параметрите от които се водят, да бъдат дефинирани преди проектирането им, затова разработката ще започне с изграждане на ориентиращия модул, за да бъдат ясни необходимите габаритни размери на подвижната платформа.

5.1. Проектно задание

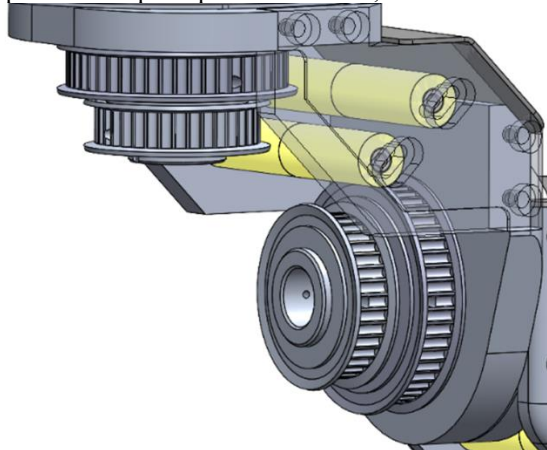
В настоящата работа, заданието цели да бъде създаден нискостойностен промишлен делта паралелен робот с допълнителен ориентиращ модул и постигнати общо 6 С.Н.С. Самият робот трябва да бъде проектиран, произведен и асемблиран, с цифрово програмно управление, предназначен за учебни цели и да е с възможност да извършва следните манипулации: сортиране, магазиниране, позициониране на сравнително леки и малагабаритни детайли, или в най общия случай „Pick and place“ операции.

5.2. Техническо задание

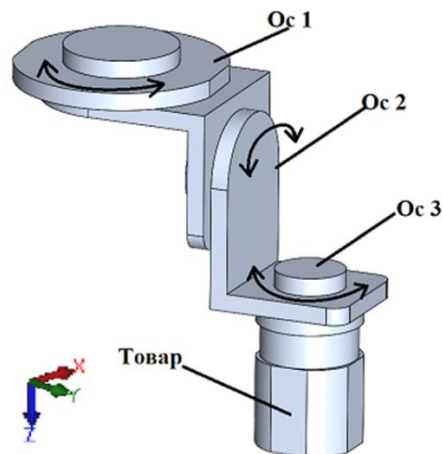
<i>Област на приложение:</i> учебни цели – анализ на промишлени манипулации в области като хранително-вкусова промишленост, фармацевтика, автомобилна промишленост и др.	
<i>Цел:</i> извършване на промишлени манипулации - сортиране, магазиниране и позициониране с допълнително ориентираше на леки детайли.	
<i>Технически изисквания:</i>	
Обхват на движение [mm]	Ф500x150
Точност на позициониране [mm]	±0.1
Ротационна повторяемост [°]	±0.1
Полезна товароносимост без ориентиращия модул [g]	1500
Полезна товароносимост със ориентиращия модул [g]	200
Вид на монтажа	таванен
Максимална транслационна скорост [m/s]	1
Максимално транслационно ускорение [m/s ²]	20
Максимална скорост на ориентация [°/s]	360
Максимална честота на цикли [picks/min]	30
Макс. размери на работната клетка [mm]	1000x1000x1000
Захранващо напрежение [V]	220
<i>Изисквания свързани с управлението:</i>	
Контролер – управлението на робота да се осъществява посредством компютър	
Интерфейс – връзката м/у управляващия компютър и системите за задвижване и позициониране на робота да се осъществява посредством „breakout board“ и сериен интерфейс RS232.	
<i>Изисквания към разпределителното табло на робота:</i> Таблото трябва да отговаря на стандарт за сигурност IP58. В него трябва да са разположени серво управленията, захранващия блок както и комуникационната платка	
<i>Изисквания за безопасност:</i> наличие на бутон за аварийен стоп на машината разположен в близост до комплекса, както и наличие на светлинна индикация при грешки. Роботът трябва да отговаря на стандарт за сигурност IP30	
<i>Условия на експлоатация:</i>	
Температурен режим [°C]	20±2
Относителна влажност [%]	60±20

5.3. Разработване на ориентиращ модул за паралелен делта робот

Предвид малките въртящи моменти за модула са използвани ремъчни предавки фиг.5.4. без допълнителен редуктор, което е и оптималното решение от гледна точка на тегло. Ремъците се избират от каталог спрямо мощността която ще предават. Предвид изчислените мощности е избран ремък GT3 с ширина 6 [mm]. Серия GT ремъци се използват за прецизни цели. Диаметърът на ролките също е избран спрямо предаваната мощност, тъй като от него зависи колко броя зъби са зацепени между ремъка и ролката. По-малките ролки зацепват по-малко зъби на ремъка и съответно възможната предавана мощност е по-малка. За 1-ва и 2-ра ос са избрани ролки с 48 зъба, а за 3-та с 36.

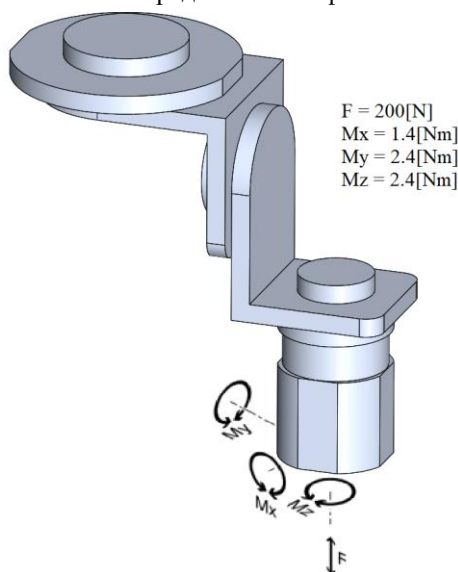


Фиг.5.4. Разработен вариант на ремъчни предавки

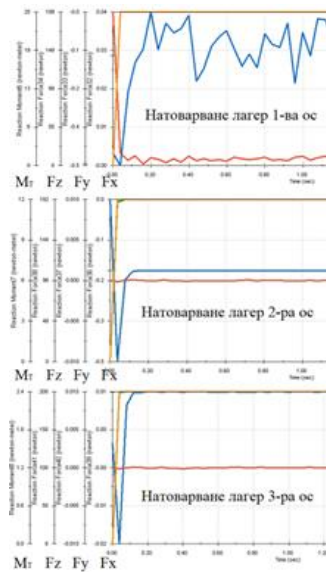


Фиг.5.6. Опростен модел на манипулатора

Статичния анализ е извършен чрез симулация в среда за компютърно моделиране. За целта е създаден опростен модел на механизма фиг. 5.6, който е подложен на натоварване 4 пъти по голямо от максимално допустимото за хващач размер 16. Това е натоварването на което лагерите ще бъдат оразмерени за да се гарантират техните номинални часове живот. На фиг.5.7 е представена схемата на натоварването, а резултатите от анализа са представени на фиг.5.8.



Фиг.5.7. Схемата на натоварване

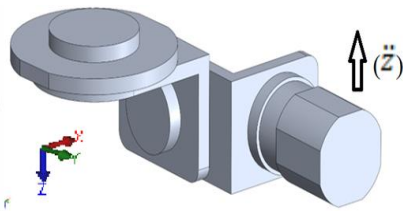


Фиг.5.8. Резултат от статичния анализ

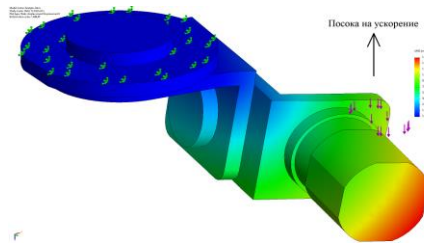
За да се изчислят силите във валове се съставя опростен модел на механизма фиг.5.6, като се вземат в предвид размерите на звената от първоначално съставената кинематична схема заедно със първоначалните приблизителни теглата и теглото на движещата се маса (полезен товар). За да се намерят максималните натоварвания върху лагерите, се разглежда най-тежкия вариант, който е ускорение във вертикално направление нагоре (\ddot{z}). При него натоварването е най-високо, тъй като по задание транслационните ускорения трябва да достигнат до $20[m/s^2]$, а при движение нагоре това ускорение трябва да се постигне чрез преодоляване на максималните сили на тежест. При анализа се разглежда вариант при който ос 3 е под $90[^\circ]$ спрямо основата фиг.5.9, при тази конфигурация наклонящия момент M_T е най-голям. Резултатите от изследването за представени на фиг.5.10, където F_x , F_y и F_z са съответните реактивни сили по направление на всяка координата, а M_T е наклонящия момент, действащи върху лагерите при ускорение на работата \ddot{z} .

отговарящи за реализиране на трите оси. Върху платформата са разположени входящите ролки и обтегачи. Те задвижват осите на манипулатора, като предават въртящ момент посредством система от валове и ролки. Компонентите на манипулатора са изработени от алуминий с цел редуциране на теглото. Схемата на предаване на задвижващия момент е представена на фиг.5.12.

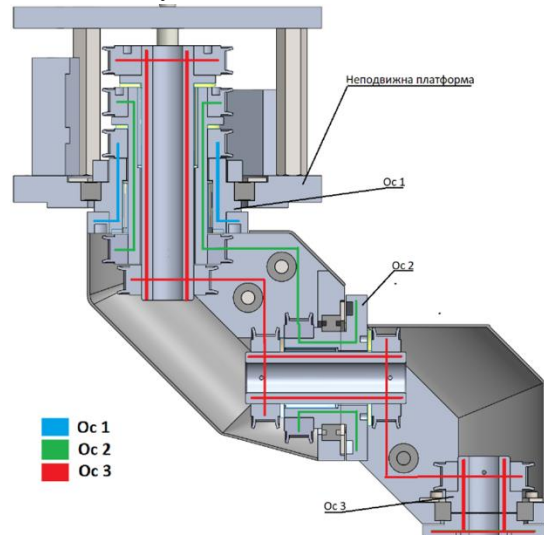
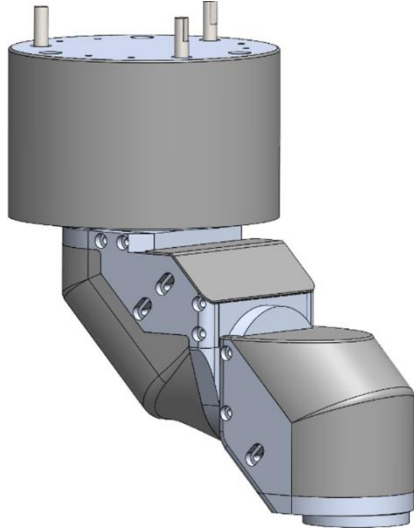
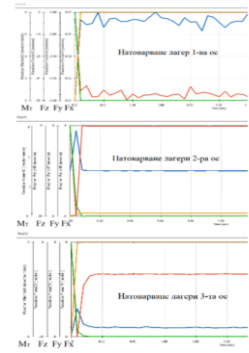
Конструкцията на ориентиращия модул фиг.5.11 е съставена от неподвижна платформа и три звена



Фиг. 5.9 Поза за изследване на натоварването



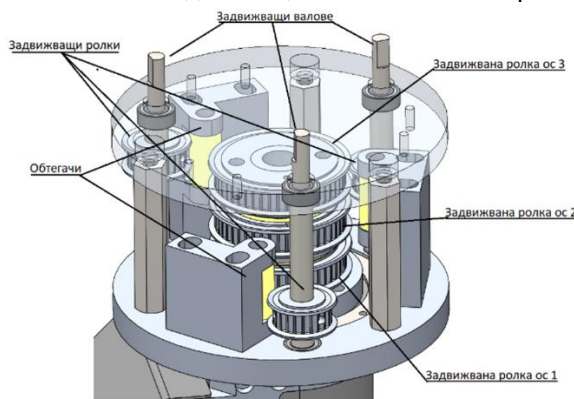
Фиг. 5.10. Резултати от динамичния анализ



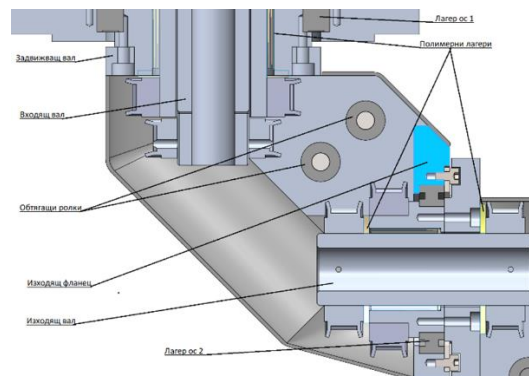
Фиг.5.11. Конструкция на ориентиращ модул Фиг.5.12. Сечение на ориентиращия модул

Неподвижната платформа фиг.5.13 е съставена от две алуминиеви плочи в които са изкопани леглата на лагерите за ролките и ос 1. Върху нея са разположени 3 комплекта задвижващи и задвижвани входящи ролки отговарящи за задвижването на трите оси. Платформата заедно с нейните елементи може да бъде интегрирана в подвижната платформа на делта робот. За всеки от трите комплекта има регулируем обтегач реализиран от полимерна ролка директно лагерувана върху алуминиев вал. Ролките и основите на обтегачите са алуминиеви с цел редуциране на теглото. Задвижващите валове са стоманени за разлика от задвижваните които са с по-голям диаметър и централен проходен отвор служещ за окабеляване на К.И.З. при необходимост.

Конструкцията на ос 1 фиг.5.14 е съставена от задвижващ вал лагеруван посредством сачмен лагер 6810ZZ към неподвижната платформа и изходящ фланец в който е разположен лагерът за задвижващия вал на ос 2. Връзката м/у валът и фланеца се осъществява посредством 2 странични плочи, към които са монтирани обтягащите полимерни ролки. Входящите валове за задвижване на ос 2 и 3, както и изходящия вал за ос 3 са лагерувани чрез полимерни плъзгащи лагери. Изходящия вал за ос 2 е лагеруван от сачмен лагер 6807ZZ тъй като той се явява задвижващия вал на ос 2 и не трябва да има наличие на хлабини.

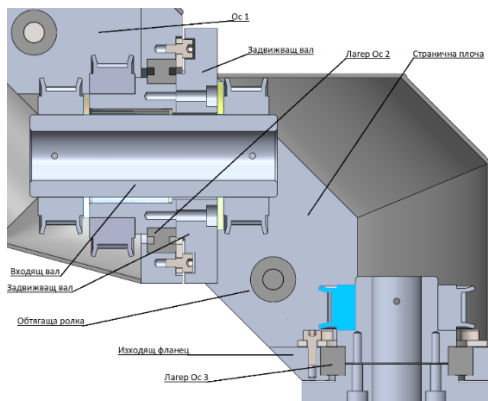


Фиг.5.13. Реализация на статичната платформа

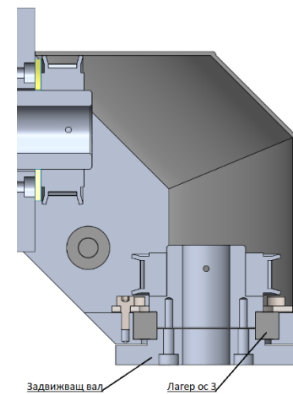


Фиг.5.14. Сечение на ос 1

Конструкцията на ос 2 фиг.5.15 е аналогична на ос 1, съставена от задвижващ вал, изходящ фланец и странични плочи. На страничните плочи е монтирана регулируемата обтягащата ролка за ремъка на последната ос. На изходящия фланец е монтиран сачмен лагер 6805ZZ за ос 3. Входящия вал за ос 1 е лагеруван посредством полимерни лагери, а на изходящия чрез сачмения за ос 3.

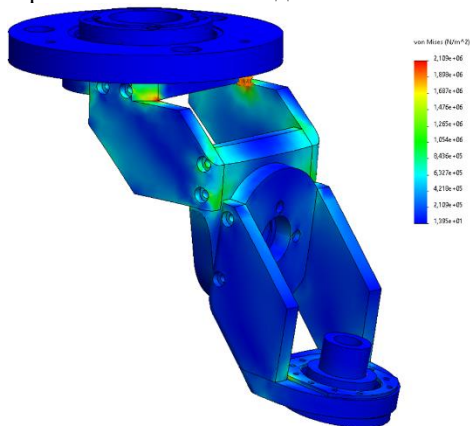


Фиг.5.15. Сечение на ос 2

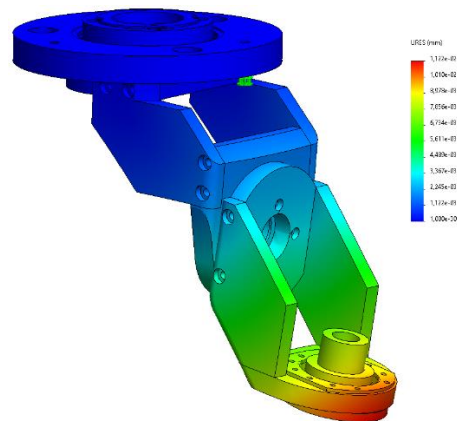


Фиг.5.16. Сечение на ос 3

Конструкцията на ос 3 фиг.5.16 представлява просто вал лагеруван от лагера в изходящия фланец на ос 2. Върху плочата на вала се монтира К.И.3 на работата. В тази стъпка е направен анализ на вече дефинираната конструкция на всяко едно от звената на манипулатора. Това се прави с цел да се провери дали, вече подробен моделираните градивни елементи на системата биха издържали на натоварването. Ако натоварването е извън допустимите граници за материала на детайлите, то те трябва да се оразмерят наново така, че да няма опасност от счупването им. На фиг. 5.17 е представен резултата от анализа. Както се вижда натоварванията върху отделните детайли са в норма. Това се дължи главно на изборът на конструкция на звената със странични плочи, които драстично уякчават конструкцията на модула. На фиг. 5.18 е представена максималната деформация от натоварването на звената. Това е показател за коравината на механизма и е от значение за точността на позициониране. Както се вижда максималните деформации са 0.02[mm], което е предостатъчно предвид търсената точност по задание.



Фиг.5.17. Максимално натоварване на елементите на модула



Фиг.5.18. Максимални деформации на модула при натоварване

След конструирането на звената може да се провери натоварването на осите с реалните маси и инерционни моменти:

$$\begin{aligned}
 I_2 &= 0,035 \text{ [kg/m}^2\text{]} & m_1 &= 0,4 \text{ [kg]} & L_1 &= 118 \\
 I_2 &= 0,035 \text{ [kg/m}^2\text{]} & m_2 &= 0,3 \text{ [kg]} & L_2 &= 110 \\
 I_1 &= 0,06 \text{ [kg/m}^2\text{]} & m_3 &= 0,1 \text{ [kg]} & & \\
 & & m_4 &= 0,5 \text{ [kg]} & &
 \end{aligned}$$

От където чрез (5.7), (5.8), (5.9), (5.10) и (5.11) може да се намери:

$$T_1 = 3.3 \text{ [N/m]}$$

$$T_2 = 2.8 \text{ [N/m]}$$

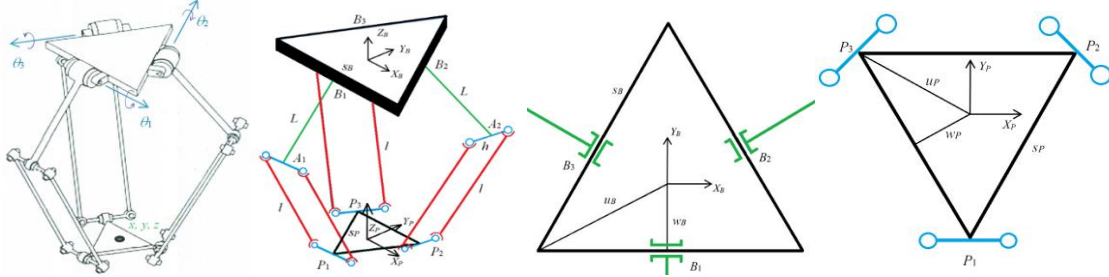
$$T_3 = 0.3 \text{ [N/m]}$$

Резултатите са равни или по ниски от ориентировъчно изчислените, следователно ремъчните предавки и усилията в лагерите са правилно изчислени. Цялостното тегло на модула заедно със статичната платформа и полезен товар от 0,5 [kg] е 1,51 [kg] което е в границите на товароносимостта по задание на работата.

Предложената конструкция не е съвършена. Например съставните детайли на звена могат да бъдат заменени от монолитни лети детайли, което да намали теглото и себестойността на продукта. Използването на подобен ориентиращ модул може значително да повиши гъвкавостта и възможните приложения на един паралелен робот делта робот. Това дава възможност за възползването от предимствата на паралелните роботи без да се налагат ограничения вследствие споменатите проблемите свързани с конструкцията и управлението му.

5.4. Разработване на паралелен „Делта“ робот

Делта роботът е съставен от две платформи, подвижна и неподвижна свързани помежду си посредством три единични кинематични вериги разположени симетрично под $120 [^\circ]$ една спрямо друга фиг.5.19. Самите вериги са от тип RRPR където Р е шарнирен четиризвенник и ако вземем предвид ставите на паралелограма можем да опростим като RUU, където U е шарнир на Хук, а задвижваното звено е първата ротационна става. Променливите на задвижваните стави са $\theta_i, i = 1,2,3$, при което положителна посока на ротация се определя по правилото на дясната ръка и нулева стойност когато звената са хоризонтални.



Фиг.5.19. Схема на „Делта“ робот [92] Фиг.5.20. Кинематична схема на делта робот [92] Фиг.5.21. а) параметри на неподвижна платформа; б) параметри на подвижна платформа

На фиг.5.20 са представени геометричните параметри на робота, където SB е координатната система на неподвижната платформа, а SP координатната система на подвижната платформа. Ориентацията на P спрямо B е винаги идентична, без значение от положението и, т.е. ротационната матрица $BRP = I$ е винаги константа. Променливите на задвижваните звена могат да бъдат записани под векторна форма като $\theta = [\theta_1 \theta_2 \theta_3]^T$, а обобщения параметър за позицията на P спрямо B, като $BPP = [x \ y \ z]^T$. точки $B_i, i = 1, 2, 3$, са бедрата, точки $A_i, i = 1, 2, 3$, са коленете и точки $P_i, i = 1, 2, 3$, са глезените на робота. На следващата фиг. 5.21 са представени геометричните параметри на двете платформи, за които могат да се запишат следните зависимости:

$${}^B B_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ -w_B \\ 0 \end{Bmatrix}, {}^B B_2 = \begin{Bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} w_B \\ \frac{1}{2} w_B \\ 0 \end{Bmatrix}, {}^B B_3 = \begin{Bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} w_B \\ \frac{1}{2} w_B \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5.12)$$

$${}^P P_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ -u_P \\ 0 \end{Bmatrix}, {}^P P_2 = \begin{Bmatrix} \frac{S_P}{2} \\ w_P \\ 0 \end{Bmatrix}, {}^P P_3 = \begin{Bmatrix} -\frac{S_P}{2} \\ w_P \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5.13)$$

Върховете на равностранния триъгълник на неподвижната основа са:

$${}^B b_1 = \begin{Bmatrix} \frac{S_B}{2} \\ -w_B \\ 0 \end{Bmatrix}, {}^B b_2 = \begin{Bmatrix} 0 \\ u_B \\ 0 \end{Bmatrix}, {}^B b_3 = \begin{Bmatrix} -\frac{S_B}{2} \\ -w_B \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5.14)$$

Където:

$$w_B = \frac{\sqrt{3}}{6} S_B, u_B = \frac{\sqrt{3}}{3} S_B, w_P = \frac{\sqrt{3}}{6} S_P, u_P = \frac{\sqrt{3}}{3} S_P \quad (5.15)$$

За да се изчисли степента на мобилност на робота, трябва да се пренебрегне паралелограмния механизъм и да се възприеме като едно звено. Тогава чрез формулата на Грублер (5.8) се получава:

$$m = 6(l - n - 1) + \sum_{i=1}^n d_i = 6(8 - 9 - 1) + 15 = 3 \quad (5.16)$$

Където:

8 – брой звена, 9 - брой кинематични двойци, 15 - сумарен брой С.Н.С на всички двойци.

Размерния синтез се извършва до постигане на някакъв показател от механизма на робота. В нашия случай това е работното пространство. Тъй като роботът е със сравнително проста кинематика, самият размерен синтез е извършен чрез симулация в среда за компютърно моделиране. По този начин може да се изследва влиянието на всеки един от геометричните параметри на робота върху работното му пространство. За целта трябва да се създаде първоначален опростен 3D модел на механизма на робота. В нашия случай, при съставянето на този модел се вземат предвид следните ограничения:

- Възможностите за ъглово отместване на съединеният реализиращи ставите на кинематичните вериги. Както беше представено в предишната глава, работното пространство на паралелните работи се влияе драстично от този показател. В най-общия случай в кинематичната верига на „Делта“ роботът участват два шарнира на Хук. За реализацията на тези стави, най-често се прибегва до използването на сферични накрайници, тъй като са с доста по проста конструкция, по-малко лагерувани тела и съответно по-малък риска от неточности. Повечето производители на „Делта работи“ проектират свой собствени сферични накрайници които са с повишен възможен ъгъл на отместване, но предвид целите и заданието, в нашия случай е избран стандартен сферичен накрайник на фирма Igus фиг.5.22, с възможно ъглово отместване α от $26[^\circ]$.

- Размер на долната подвижна платформа – този размер се влияе главно от изпълнителните механизми разположени върху нея, в нашия случай това е ориентирация модул, като стремежът е размерът на долната подвижна платформа да е минимален с цел редуциране на теглото, което е задвижвано от робота. Размерите на подвижната платформа влияят пряко върху ширината на шарнирния четиризвенник h и нейното тегло. При размерния синтез се търси оптимална комбинация на тази параметри. По-голямата ширина h , повишава стабилността на подвижната платформа, а по-малката маса намалява динамичното натоварване и повишава товароносимостта. В най-общия случай тази ширина се определя от това колко големината на платформата допуска. Така като се има в предвид размерът на ориентирация модул, за долната подвижна платформа получаваме параметрите описани на фиг.5.23. Тези параметри ще са строго фиксирани и няма да бъдат променени в етапа на размерен синтез.

За да се състави първоначалният опростен модел на робота, с който да се извърши размерния синтез, трябва да се заложат някакви първични размери на звената на робота, с които да се стартира процеса на анализ. За целта се предприема следния подход. В табл.5.1 са представени параметрите на индустриален делта робот ABB IRB360-X800, който е с диаметър на работното пространство 800[mm]. По задание, проектирания робот трябва да е с диаметър на работното пространство от 500[mm]. Така можем да изведем коефициент на зависимост $\Omega = 500/800$, който представлява зависимост на размерите на звената на робота спрямо работното пространство. Така умножавайки всеки един от параметрите в табл.5.1 с Ω , можем да намерим първичните размери на първоначалния опростен модел табл.5.2, с които можем да съставим опростен модел фиг.5.24, върху който да извършим анализа. Трябва да се отбележи, че тъй като избраната компютърна среда за моделиране не се справя добре с реализацията на ограниченията на сферичните крайници, е съставен еквивалентен опростен модел със 2 ротационни С.Н.С, под формата на шарнири на Хук фиг.5.25 със заложен ограничения на допустимите ъглови отклонения α на сферичните крайници. Приети са 2 СНС, а не 3, тъй като 3-тата С.Н.С на сферичния на крайник не влияе върху кинематиката на делта роботът.

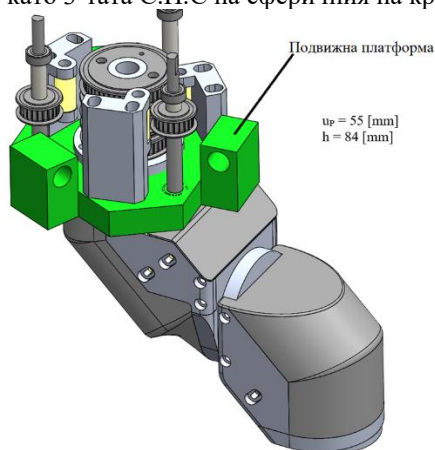


Табл.5.1. Параметри на ABB IRB360-X800

Параметър	Значение	Стойност [mm]
sB	Страна на равностранныя триъгълник на неподвижната платформа	692,82
sP	Страна на равностранныя триъгълник на подвижната платформа	77,94
L	Дължина на горна част на крака	235
l	Дължина на долна част на крака - паралелограм	800
h	Ширина на паралелограма	100
wB	Равнинно разстояние от {0} до близката страна на равностранныя триъгълник на неподвижната платформа	200
uB	Равнинно разстояние от {0} до основен връх на триъгълник на неподвижната платформа	400
wP	Равнинно разстояние от {P} до близката страна на равностранныя триъгълник на подвижната платформа	22,55
uP	Равнинно разстояние от {P} до основен връх на триъгълник на подвижната платформа	44,95

Фиг.5.23. Подвижна платформа с наложен модел на ориентирация модул

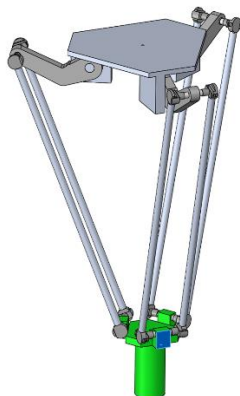
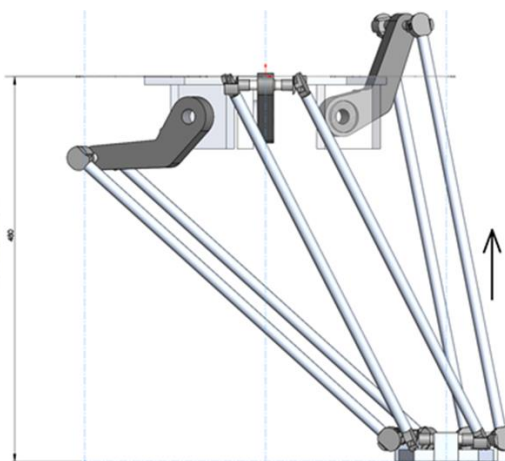
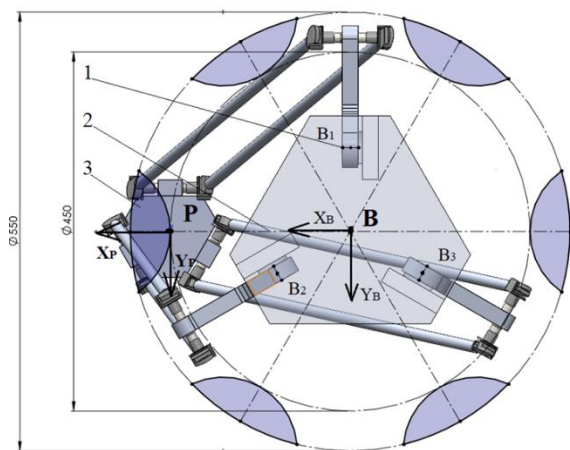


Табл.5.2. Параметри на първоначалния опростен модел на робота

Параметър	Значение	Стойност [mm]
L	Дължина на горно рамо	146
l	Дължина на горна част на крака	530
h	Дължина на долна част на крака - паралелограм	84
wB	Равнинно разстояние от {0} до близката страна на равностранныя триъгълник на неподвижната платформа	125
uP	Равнинно разстояние от {P} до основен връх на триъгълник на подвижната платформа	55

Фиг.5.24. Първоначален опростен модел на разработвания робот

За да се намери максималното работно пространство на дадена конфигурация, трябва да се изследват позите на робота при които някои от сферичните стави, достигат предела на своя ъгъл на отклонение. Това се случва в зони на ограничение по периферията на работното пространство, дефинирани от линии поз.1 фиг.5.26 преминаващи през координатната система В, успоредни на осите на въртене на горните крака на робота поз.2. Общия брой на тези линии е 3, а съответно на зоните на ограничение б поз.3, тъй като преминават през периферията на работното пространство в две зони.



Фиг.5.26. Зони на ограничения на работното пространство **Фиг.5.27. Начална позиция на крака при намиране на максимално работно пространство**

Максималното работно пространство се намира с движение на долната подвижна платформа Р по продължение на една от линиите успоредни на оста на въртене на горната част на крака, до достигане на предела на ъглово отместване на сферичните крайници. Трябва да се отбележи, че това движение се извършва когато най-близката кинематична верига е вдигната максимално нагоре фиг.5.27. Достатъчно е този анализ да се извърши в близост до една от зоните на ограничение. Максималното работно пространство за конфигурацията в хоризонтално направление, се получава от радиуса описан от точки В и Р. За да се намери границата в вертикално направление, подвижната платформа се движи надолу до достигане на предела на някои от сферичните крайници фиг.5.29. Всяка една от разгледаните конфигурации е анализирана по този метод. Така за първата конфигурация, с параметри описани в табл.5.2 се получава работно пространство цилиндър с размери 450 x 190 [mm], което е незадоволително.

За да се определи влиянието на размера на статичната платформа към работното пространство, w_B се променя на 175 [mm] и се извършва анализ на конфигурация с параметри описани в табл.5.3, по аналогичен начин на предходния. След направения анализ могат да се направят следните заключения:

- Увеличаването на размерът на горната платформа не влияе съществено върху размера на работното пространство.
- Прекалено голяма неподвижна платформа може да доведе до колизии между горната и долната част на краката на робота фиг.5.29.
- От гледна точка на компактност е желателно горната платформа да е с минимални размери с ограничения описани в началото на размерния синтез, така за настоящата разработка се получава оптимален размер $w_B = 105$ [mm].

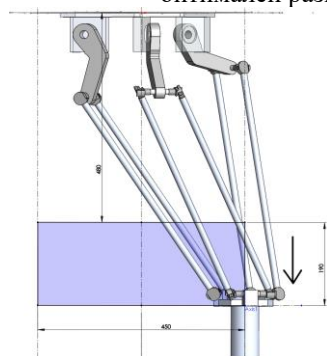


Табл.5.3 Промяна на параметрите

Параметър	Значение	Стойност [mm]
L	Дължина на горно рамо	146
l	Дължина на горна част на крака	530
h	Дължина на долна част на крака - паралелограм	84
w_B	Равнинно разстояние от {0} до близката страна на равностранния триъгълник на неподвижната платформа	175
u_P	Равнинно разстояние от {P} до основен връх на триъгълник на подвижната платформа	55

Фиг.5.28. Крайна позиция на крака при намиране на максимално работно пространство

За да се определи влиянието на дължината на горната част на крака, дължината на L се променя на 120[mm] и се извършва анализ на конфигурация с параметри описани в табл.5.4. Така от направения анализ могат да се направят следните заключения:

- Промяната на дължината на горната част на крака на робота влияе право пропорционално върху работното пространство във вертикално направление фиг.5.30. При $L = 120$ [mm] работното пространство е цилиндър с размери 450x150[mm].
- Удачно е да се търси минимална дължина на L, спрямо работно пространство изискано от заданието, тъй като така се намалява натоварването на двигателите.
- При $L = 120$ [mm] дълбочината на работното пространство е 150[mm], което отговаря на изисканото по задание, следователно се приема за окончателна стойност.

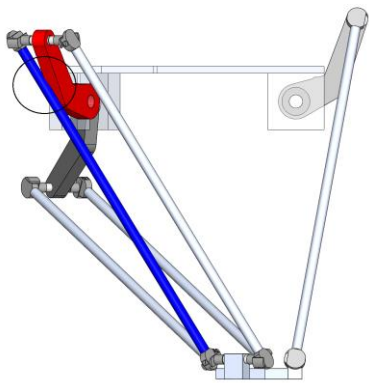


Табл.5.4. Промяна на параметрите

Параметър	Значение	Стойност [mm]
L	Дължина на горно рамо	120
l	Дължина на горна част на крака	530
h	дължина на долна част на крака - паралелограм	84
wB	Равнинно разстояние от {0} до близката страна на равностранния триъгълник на неподвижната платформа	105
uP	Равнинно разстояние от {P} до основен връх на триъгълник на подвижната платформа	55

Фиг.5.29 Конфигурация с параметри от табл.5.3

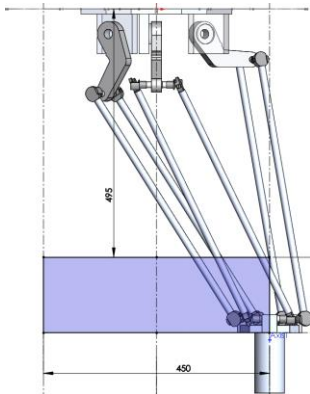


Табл.5.5. Промяна на параметрите

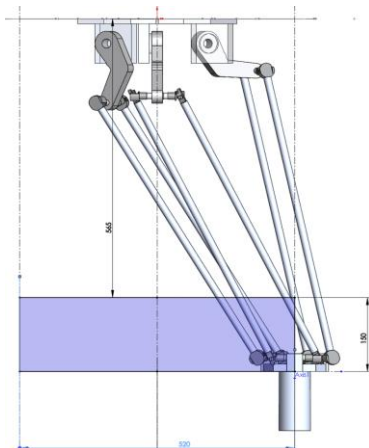
Параметър	Значение	Стойност [mm]
L	Дължина на горно рамо	120
l	Дължина на горна част на крака	580
h	дължина на долна част на крака - паралелограм	84
wB	Равнинно разстояние от {0} до близката страна на равностранния триъгълник на неподвижната платформа	105
uP	Равнинно разстояние от {P} до основен връх на триъгълник на подвижната платформа	55

Фиг.5.30 Работно пространство на конфигурация с параметри от табл.5.4

За да се разбере влиянието на дължината на долната част на крака, дължината на l се променя на 580[mm] и се извършва анализ на конфигурация с параметри описани в табл.5.5. Така от направения анализ могат да се изложат следните заключения:

- Промяната на дължината на долната част на крака на работа влияе право пропорционално върху работното пространство в хоризонтално направление фиг.5.31. При l = 580[mm] работното пространство е цилиндър с размери 520x150[mm].
- При l = 580[mm] ширината на работното пространство е 520[mm], което отговаря на изисканото по задание, следователно се приема за окончателна стойност.

Табл.5.6. Окончателен избор на размерните параметри на работа



Параметър	Значение	Стойност [mm]
sB	Страна на равностранния триъгълник на неподвижната платформа	363,73
sP	Страна на равностранния триъгълник на подвижната платформа	95,26
L	Дължина на горна част на крака	120
l	Дължина на долна част на крака - паралелограм	580
h	Ширина на паралелограма	84
wB	Равнинно разстояние от {0} до близката страна на равностранния триъгълник на неподвижната платформа	105
uB	Равнинно разстояние от {0} до основен връх на триъгълник на неподвижната платформа	210
wP	Равнинно разстояние от {P} до близката страна на равностранния триъгълник на подвижната платформа	27,5
uP	Равнинно разстояние от {P} до основен връх на триъгълник на подвижната платформа	55

Фиг.5.31. Работно пространство на конфигурация с параметри от табл.5.5

Така за окончателен избор на размерните параметри се приемат описаните в табл. 5.6. С това етапа на първоначален размерен синтез приключва.

$$\left\{ {}^B \mathbf{B}_i \right\} + \left\{ {}^B \mathbf{L}_i \right\} + \left\{ {}^B \mathbf{l}_i \right\} = \left\{ {}^B \mathbf{P}_P \right\} + \left[{}^B_P \mathbf{R} \right] \left\{ {}^P \mathbf{P}_i \right\} = \left\{ {}^B \mathbf{P}_P \right\} + \left\{ {}^P \mathbf{P}_i \right\} \quad (5.17)$$

Където [BRP] = [I3] тъй като ориентацията на подвижната платформа е винаги еднаква с тази на неподвижната, а векторът $\mathbf{BP}_P = [x \ y \ z]^T$ описва координатите на подвижната платформа. Векторите \mathbf{l}_i зависят от променливите на задвижваните звена $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$:

$${}^B L_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ -L \cos \theta_1 \\ -L \sin \theta_1 \end{Bmatrix}, {}^B L_2 = \begin{Bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} L \cos \theta_2 \\ \frac{1}{2} L \cos \theta_2 \\ -L \sin \theta_2 \end{Bmatrix}, {}^B L_3 = \begin{Bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} L \cos \theta_3 \\ \frac{1}{2} L \cos \theta_3 \\ -L \sin \theta_3 \end{Bmatrix} \quad (5.18)$$

Замествайки ги в (5.17) за li се получава:

$$\{{}^B l_1\} = \begin{Bmatrix} x \\ y + L \cos \theta_1 + a \\ z + L \sin \theta_1 \end{Bmatrix}, \{{}^B l_2\} = \begin{Bmatrix} x - \frac{\sqrt{3}}{2} L \cos \theta_2 + b \\ y - \frac{1}{2} L \cos \theta_2 + c \\ z + L \sin \theta_2 \end{Bmatrix}, \{{}^B l_3\} = \begin{Bmatrix} x + \frac{\sqrt{3}}{2} L \cos \theta_3 - b \\ y - \frac{1}{2} L \cos \theta_3 + c \\ z + L \sin \theta_3 \end{Bmatrix} \quad (5.19)$$

Където:

$$a = w_B - u_P, b = \frac{S_P}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} w_B, c = w_P - \frac{1}{2} w_B \quad (5.20)$$

Така като се знае, че [BBi] и [PPi] са константи зависещи от геометрията на робота и се замести [Li] и [li] в (5.17) приравнявайки към 0, се получават трите константни уравнения описващи кинематиката на делта роботите:

$$\begin{aligned} 2L(y+a)\cos\theta_1 + 2zL\sin\theta_1 + x^2 + y^2 + z^2 + a^2 + L^2 + 2ya - l^2 &= 0 \\ -L(\sqrt{3}(x+b) + y+c)\cos\theta_2 + 2zL\sin\theta_2 + x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 + 2xb + 2yc - l^2 &= 0 \\ L(\sqrt{3}(x-b) - y-c)\cos\theta_3 + 2zL\sin\theta_3 + x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 - 2xb + 2yc - l^2 &= 0 \end{aligned} \quad (5.21)$$

А за точките Ai:

$${}^B A_i = {}^B B_i + {}^B L_i, i = 1, 2, 3 \quad (5.22)$$

Следователно:

$${}^B A_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ -w_B - L \cos \theta_1 \\ -L \sin \theta_1 \end{Bmatrix}, {}^B A_2 = \begin{Bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} (w_B + L \cos \theta_2) \\ \frac{1}{2} (w_B + L \cos \theta_2) \\ -L \sin \theta_2 \end{Bmatrix}, {}^B A_3 = \begin{Bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} (w_B + L \cos \theta_3) \\ \frac{1}{2} (w_B + L \cos \theta_3) \\ -L \sin \theta_3 \end{Bmatrix} \quad (5.23)$$

Така за обратната кинематична задача от (5.21) може да се запише:

$$E_i \cos \theta_i + F_i \sin \theta_i + G_i = 0, i = 1, 2, 3 \quad (5.24)$$

Където:

$$\begin{aligned} E_1 &= 2L(y+a), F_1 = 2zL, G_1 = x^2 + y^2 + z^2 + a^2 + L^2 + 2ya - l^2 \\ E_2 &= -L(\sqrt{3}(x+b) + y+c), F_2 = 2zL, G_2 = x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 + 2(xb + yc) - l^2 \\ E_3 &= L(\sqrt{3}(x-b) - y-c), F_3 = 2zL, G_3 = x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 + 2(-xb + yc) - l^2 \end{aligned}$$

Ако се дефинират:

$$t_i = \tan \frac{\theta_i}{2}, \cos \theta_i = \frac{l - t_i^2}{l + t_i^2}, \sin \theta_i = \frac{2t_i}{l + t_i^2}$$

И се замести в (5.24):

$$E_i \left(\frac{l - t_i^2}{l + t_i^2} \right) + F_i \left(\frac{2t_i}{l + t_i^2} \right) + G_i = 0, E_i(l - t_i^2) + F_i(2t_i) + G_i(l + t_i^2) = 0, (G_i - E_i)t_i^2 + (2F_i)t_i + (G_i + E_i) = 0$$

Се получава:

$$t_{i,2} = \frac{-F_i \pm \sqrt{E_i^2 + F_i^2 - G_i^2}}{G_i - E_i} \quad (5.25)$$

Решавайки (5.25) за θ_i се получава зависимостта на променливите на задвижваните звена от положението на подвижната платформа:

$$\theta_i = 2 \tan^{-1}(t_i) \quad (5.26)$$

Така заради \pm в (5.25) се получава по две валидни решения за всяка една кинематична верига или общо 8 за целия робот, като за правилно решение се избира това при което всички колена на кинематичните вериги са изкривени навън вместо навътре. След като $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ са дадени лесно могат да се намерят точките ВАi от (5.22). След което, като се знае че, [BRP] = [I3] тъй като ориентацията на подвижната платформа е винаги еднаква с тази на неподвижната, могат да се дефинират центровете ВАiv на 3 виртуални сфери фиг.5.33.

$${}^B A_{1v} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -w_B - L \cos \theta_1 + u_P \\ -L \sin \theta_1 \end{Bmatrix}, {}^B A_{2v} = \begin{Bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} (w_B + L \cos \theta_2) - \frac{S_P}{2} \\ \frac{1}{2} (w_B + L \cos \theta_2) - w_P \\ -L \sin \theta_2 \end{Bmatrix}, {}^B A_{3v} = \begin{Bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} (w_B + L \cos \theta_3) + \frac{S_P}{2} \\ \frac{1}{2} (w_B + L \cos \theta_3) - w_P \\ -L \sin \theta_3 \end{Bmatrix} \quad (5.27)$$

Така се дефинират сферите под формата на вектор ($\{c\}$, r), където c е центърът, r е радиусът и се получават 3 сфери:

$$(\{{}^B A_{1v}\}, l), (\{{}^B A_{2v}\}, l), (\{{}^B A_{3v}\}, l) \quad (5.28)$$

Решението на правата кинематична задача е пресечната точка на тези сфери. В най-общия случай, този алгоритъм дава две решения, като за правилно се избира това при което точката се намира под координатната система на неподвижната платформа. Нещо съществено, което трябва да се отбележи е, че при някой алгоритми могат да доведат до сингулярно (делене на 0) решение когато центровете на всичките 3 сфери имат еднаква координата по направление на Z.

Начин за коригирането на този проблем е чрез завъртане на координатите, така че всички $\{ \text{BAiv} \}$ Z координати да бъдат различни. При този подход след получаване на решението, всички координати трябва да бъдат трансформирани обратно за да се получи реалното решение. Друг опростен метод за намиране на пресечна точка на сфери е следния: приемаме, че знаем центровете и радиусите на трите сфери $(c1, r1)$, $(c2, r2)$ и $(c3, r3)$, както и техните координати $c1 = \{ x1, y1, z1 \}$, $c2 = \{ x2, y2, z2 \}$, $c3 = \{ x3, y3, z3 \}$, като залагаме че всички координати по Z са еднакви $z1 = z2 = z3 = zn$, тъй като това е най-трудното решение. Така за пресечната точка на трите сфери може да се запише:

$$\begin{aligned} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_n)^2 &= r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_n)^2 &= r_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_n)^2 &= r_3^2 \end{aligned} \quad (5.29)$$

Където $P = \{x, y, z\}$, разширявайки (5.29) се получава:

$$\begin{aligned} x^2 - 2x_1x + x_1^2 + y^2 - 2y_1y + y_1^2 + z^2 - 2z_nz + z_n^2 &= r_1^2 \\ x^2 - 2x_2x + x_2^2 + y^2 - 2y_2y + y_2^2 + z^2 - 2z_nz + z_n^2 &= r_2^2 \\ x^2 - 2x_3x + x_3^2 + y^2 - 2y_3y + y_3^2 + z^2 - 2z_nz + z_n^2 &= r_3^2 \end{aligned} \quad (5.30)$$

Като се извади последното уравнение от първото и след това от второто се получава:

$$\begin{aligned} 2(x_3 - x_1)x + 2(y_3 - y_1)y + x_1^2 + y_1^2 - x_3^2 - y_3^2 &= r_1^2 - r_3^2 \\ 2(x_3 - x_2)x + 2(y_3 - y_2)y + x_2^2 + y_2^2 - x_3^2 - y_3^2 &= r_2^2 - r_3^2 \end{aligned} \quad (5.31)$$

Така всички нелинейни изрази на неизвестните x и y се съкращават, също така всички изрази свързани с Z се съкращават тъй като $z1 = z2 = z3 = zn$ и (5.31) може да се запише в следната форма:

$$\begin{bmatrix} a & b \\ d & e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} c \\ f \end{Bmatrix} \quad (5.32)$$

Където:

$$\begin{aligned} a &= 2(x_3 - x_1), b = 2(y_3 - y_1), c = r_1^2 - r_3^2 - x_1^2 - y_1^2 + x_3^2 + y_3^2 \\ d &= 2(x_3 - x_2), e = 2(y_3 - y_2), f = r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 - y_2^2 + x_3^2 + y_3^2 \end{aligned} \quad (5.33)$$

Решението за двете неизвестни x и y :

$$x = \frac{ce - bf}{ae - bd}, y = \frac{af - cd}{ae - bd} \quad (5.34)$$

От връщане в (5.29) се намира z :

$$Az^2 + Bz + C = 0 \quad (5.35)$$

Където:

$$A = l, B = -2z_n, C = z_n^2 - r_1^2 + (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \quad (5.36)$$

Така знаейки стойностите на x и y могат да се намерят двете решения за z :

$$z_{p,m} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4C}}{2} \quad (5.37)$$

При този алгоритъм са възможни появи на две сингулярности. Първата е когато:

$$(x_3 - x_1)(y_3 - y_2) = (y_3 - y_1)(x_3 - x_2) \quad (5.38)$$

Тази сингулярност може да бъде избегната чрез правилно позициониране на неподвижната платформа спрямо кинематичните вериги. За „Делта“ тази сингулярност е избегната по начало, тъй като е със симетрична конструкция. Втората е когато е изпълнено условието:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 > r_1^2 \quad (5.39)$$

Тази сингулярност дава имагинерна стойност за z и не би се появила ако са въведени коректни входни данни за $\theta = [\theta_1 \theta_2 \theta_3]^\top$ за дадения механизъм. Като заключение може да се каже, че благодарение на своята проста конструкция, кинематиката на „Делта“ роботът избягва сингулярности и се решава сравнително просто. Скоростите и ускоренията за механизмите могат да бъдат изчислени чрез първата, съответно за скоростта, и втората производна на трите константни кинематични уравнения на работата (5.22).

$$\begin{aligned} 2L\dot{y}\cos\theta_1 - 2L(y+a)\dot{\theta}_1\sin\theta_1 + 2L\dot{z}\sin\theta_1 + 2Lz\dot{\theta}_1\cos\theta_1 + 2x\dot{x} + 2(y+a)\dot{y} + 2z\dot{z} &= 0 \\ -L(\sqrt{3}\dot{x} + \dot{y})\cos\theta_2 + L(\sqrt{3}(x+b) + y+c)\dot{\theta}_2\sin\theta_2 + 2L\dot{z}\sin\theta_2 + 2Lz\dot{\theta}_2\cos\theta_2 + 2(x+b)\dot{x} \\ + 2(y+c)\dot{y} + 2z\dot{z} &= 0 \end{aligned} \quad (5.40)$$

$$\begin{aligned} L(\sqrt{3}\dot{x} - \dot{y})\cos\theta_3 - L(\sqrt{3}(x-b) - y-c)\dot{\theta}_3\sin\theta_3 + 2L\dot{z}\sin\theta_3 + 2Lz\dot{\theta}_3\cos\theta_3 + 2(x-b)\dot{x} \\ + 2(y+c)\dot{y} + 2z\dot{z} &= 0 \end{aligned}$$

Може да се презапише като:

$$x\dot{x} + (y+a)\dot{y} + L\dot{y}\cos\theta_1 + z\dot{z} + L\dot{z}\sin\theta_1 = L(y+a)\dot{\theta}_1\sin\theta_1 - Lz\dot{\theta}_1\cos\theta_1$$

$$\begin{aligned} 2(x+b)\dot{x} + 2(y+c)\dot{y} - L(\sqrt{3}\dot{x} + \dot{y})\cos\theta_2 + 2z\dot{z} + 2L\dot{z}\sin\theta_2 &= \\ = -L(\sqrt{3}(x+b) + y+c)\dot{\theta}_2\sin\theta_2 - 2Lz\dot{\theta}_2\cos\theta_2 & \quad (5.41) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2(x-b)\dot{x} + 2(y+c)\dot{y} + L(\sqrt{3}\dot{x} - \dot{y})\cos\theta_3 + 2z\dot{z} + 2L\dot{z}\sin\theta_3 &= \\ = L(\sqrt{3}(x-b) - y-c)\dot{\theta}_3\sin\theta_3 - 2Lz\dot{\theta}_3\cos\theta_3 & \end{aligned}$$

Или във векторна форма:

$$[A]\{\dot{X}\} = [B]\{\dot{\theta}\} \quad (5.42)$$

$$\begin{bmatrix} x & y+a+L\cos\theta_1 & z+L\sin\theta_1 \\ 2(x+b) - \sqrt{3}L\cos\theta_2 & 2(y+c) - L\cos\theta_2 & 2(z+L\sin\theta_2) \\ 2(x-b) + -\sqrt{3}L\cos\theta_3 & 2(y+c) - L\cos\theta_3 & 2(z+L\sin\theta_3) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 \\ 0 & 0 & b_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{Bmatrix}$$

Където:

$$\begin{aligned} b_{11} &= L[(y + a)\sin\theta_1 - z\cos\theta_1] \\ b_{22} &= -L[(\sqrt{3}(x + b) + y + c)\sin\theta_2 + 2z\cos\theta_2] \\ b_{33} &= L[(\sqrt{3}(x - b) - y - c)\sin\theta_3 - 2z\cos\theta_3] \end{aligned} \quad (5.43)$$

За обратната кинематична матрица на Якоб се получава:

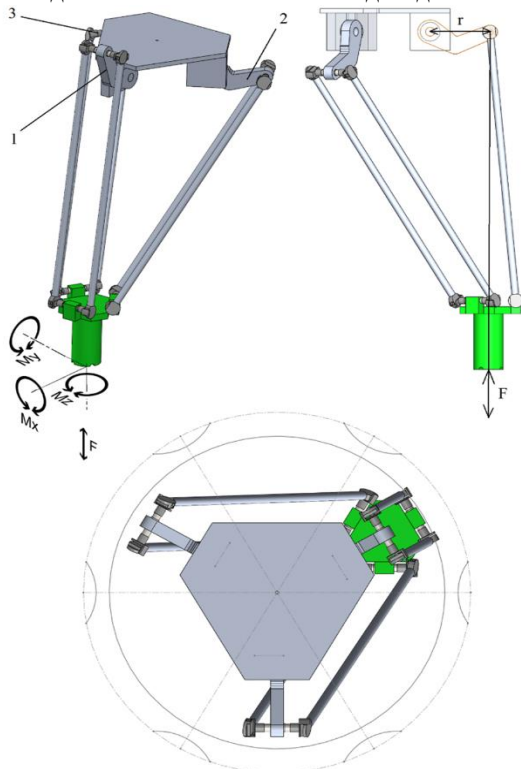
$$[B]^{-1}[A]\{\dot{X}\} = \{\dot{\theta}\}, J_k^{-1} = [B]^{-1}[A], \{\dot{\theta}\} = J_k^{-1}\{\dot{X}\} \quad (5.44)$$

За ускоренията се диференцира още веднъж (5.44):

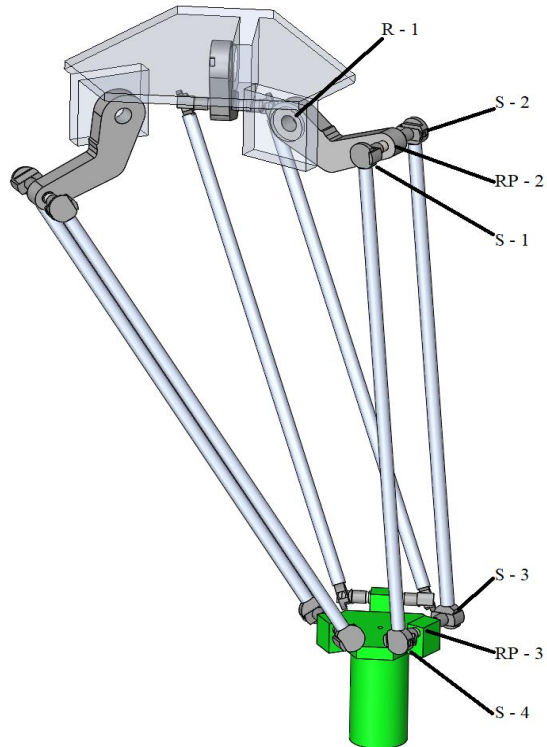
$$\{\ddot{\theta}\} = J_k^{-1}\{\ddot{X}\} + \dot{J}_k^{-1}\{\dot{X}\} \quad (5.45)$$

По задание роботът е с максимална товарносимост от 1,0 [kg] и трябва да работи със стандартен механичен хващач. Предвид ускоренията на робота и товарносимостта му, е избран максимален размер 16 на хващача с който роботът може да работи. Съответно при статичен анализ конструкцията на робота е подложена на максималното натоварване което стандартен хващач размер 16 може да издържи. Тъй като този анализ служи за определяне на натоварването в лагерите, заложените сили при симулация са 4-пъти по-големи от максималните с цел да се гарантира номинален живот на лагерите. Така могат да се зложат следните максимални натоварвания $F = 200[N]$, $M_x=1.4[Nm]$, $M_y=2.4[Nm]$, $M_z=2.4[Nm]$. Статичният анализ се извършва в CAD/CAE среда, като за целта се съставя опростен изчислителен модел на робота, показан на фиг.5.36.

Позата фиг.5.36 при която се извършва анализа е силно несиметрична $\theta_1= 90 [^\circ]$, $\theta_2= 48.08 [^\circ]$, $\theta_3= 48.08$. Така натоварването е концентрирано върху една от кинематичните вериги и могат да се изведат максимално възможните натоварвания, на които е подложена. По този начин е напълно достатъчно да се изследват натоварванията само на една от кинематичните вериги – тази която е максимално натоварена при симулация, в случая верига 1. Максимално възможните натоварвания на останалите кинематични вериги съвпадат. Позата се отличава с това, че векторът на силата F е изнесен към кинематичната верига, която е изследвана. Разстоянието r съвпада с дължината L на горното звено на кинематичната верига.

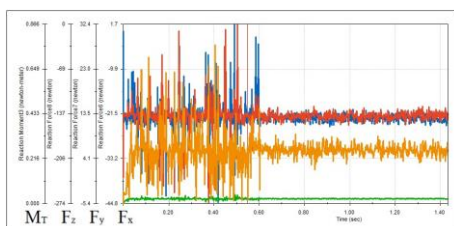


Фиг.5.36. Поза за статичен анализ

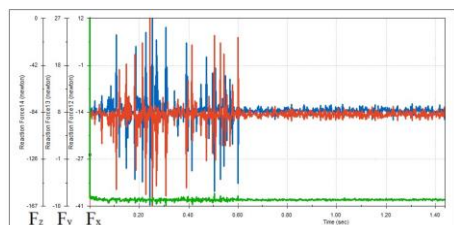


Фиг.5.37. Схема на изследваните стави

Ставите, за които са получени данни за натоварванията на които са подложени, са представени на фиг.5.37. Стави RP-2 и RP-3 са неподвижни, но усилията на които са подложени са от значение при разработване на детайлите на робота. Сферичните стави не са подложени на наклонящи моменти M_T , тъй като в рамките на работното пространство на робота това е физически невъзможно. Такова натоварване е възможно само когато ставите достигнат максималния си ъгъл на отклонение. На фиг.5.38 е представено натоварването в става R-1, а на фиг.5.39 натоварването на сферичната става S-1. Резки флукутации в изменението на натоварването във време-то, могат да се пренебрегнат тъй като те са до голяма степен резултат от това как конкретната CAD система изчислява симулацията, а не толкова до реално изменение на натоварването. При различни системи тези флукутации могат да отпаднат или да се променят, а тъй като целта на този анализ е да даде възможни натоварвания в ставите, този метод е напълно достатъчен. В табл.5.7 са представени максималните резултатни натоварвания на всички стави, чието изменение е аналогично на фиг.5.38 и фиг.5.39.



Фиг.5.38. Натоварване в става R-1



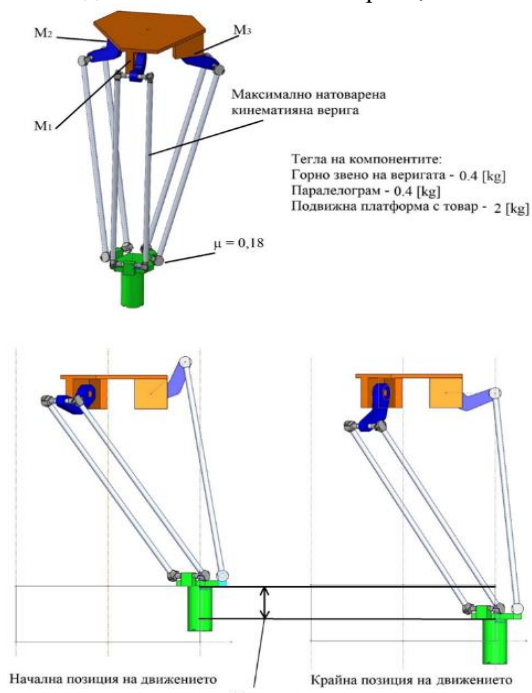
Фиг.5.39. Натоварване в става S-1

Табл.5.7. Резултати от статичен анализ

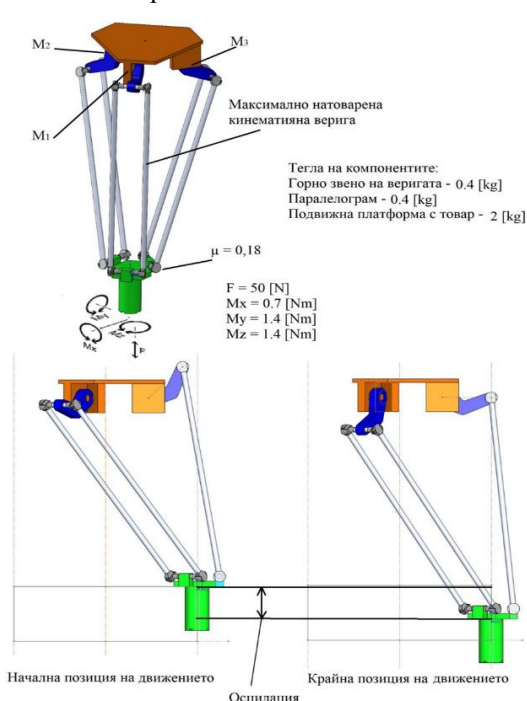
Става\ Натоварване	Mt [Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]
R-1	0.86	44.8	32.4	274
RP - 2	2.9	48	31	272
S - 1	-	41	27	167
S - 2	-	35	17	109
S - 3	-	41	28	168
S - 4	-	35	17	109
RP - 3	1.2	13	8	91

Фиг.5.39. Натоварване в става S-1

Схемите и позите на анализа, както и теглата на движещите се компоненти на робота, са изследвани в два варианта без външно натоварване (фиг.5.40 и фиг.5.50) с външно натоварване, а M1 M2 и M3 са актуаторите на робота. За тегла на подвижните части са приети както следва: горна част на крака – 0.4 [kg], паралелограм - 0.4 [kg], долна подвижна платформа със полезен товар – 1.0 [kg]. За коефициентите на триене в ставите се приемат каталожните стойности на сферичните накрайници $\mu = 0,18$. Конфигурацията при която се извършва анализа е аналогична на статичния анализ, като при симулацията се реализира осцилиращо движение на КИЗ във вертикално направление по Z, тъй като тогава натоварванията са най-големи, заради действието на гравитационните сили. Този начин на реализация на симулацията е достатъчно да се изследват натоварванията само на една от кинематичните вериги, тази която е максимално натоварена.



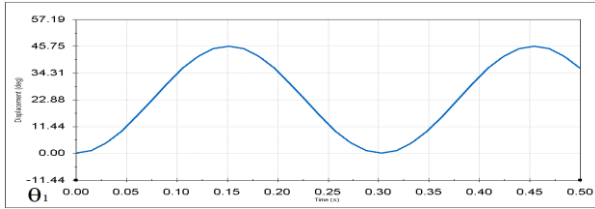
Фиг.5.40. Схема на динамичен анализ без външно натоварване



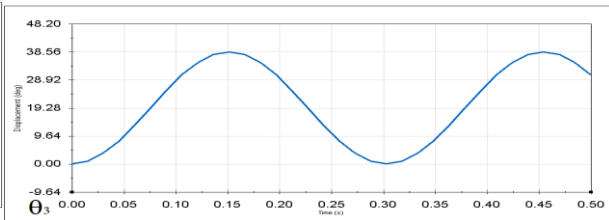
Фиг.5.50. Схема на динамичен анализ с външно натоварване

При този анализ изменението в времето на ъгълът на задвижваното звено θ_1 е представено на фиг.5.41, θ_2 на фиг.5.42, и θ_3 на фиг.5.43, за реализация на осцилиращото движение на КИЗ. Максимално достиганата скорост на ротация ω_1 , ω_2 и ω_3 на задвижващите звена на робота е представена на фиг.5.44. При тази скорост се достигат транслационни скорости на К.И.З \dot{z} (фиг.5.45) и ускорения \ddot{z} (фиг.5.46). Максималното ускорение надхвърля изисканото по задание на робота - $20[m/s^2]$. За реализиране на това ускорение, натоварването на актуаторите M1 M2 и M3 на всяка една от кинематичните вериги е представено на фиг.5.47, вижда се, че за постигане на ускоренията по задание, актуаторите на робота трябва да осигуряват поне $8 [Nm]$ въртящ момент за задвижване на звената. На фиг.5.48 е представено натоварването в става R-1, а на фиг.5.49 натоварването на сферичната става S-1. В табл.5.8 са представени максималните резултатни натоварвания на всички стави при реализация на тази осцилация, чието изменение е аналогично на фиг.5.48 и фиг.5.49.

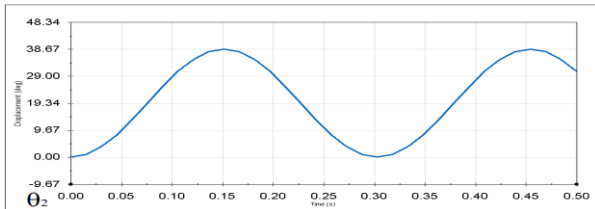
При този анализ изменението в времето на ъгълът на задвижваното звено θ_1 е представено на фиг.5.51, θ_2 на фиг.5.52, и θ_3 на фиг.5.53, за реализация на осцилиращото движение на КИЗ. Максимално достиганата скорост на ротация ω_1 ω_2 и ω_3 на задвижващите звена на робота е представена на фиг.5.54. Транслационната скорост на К.И.З по z е представена на фиг.5.55. Натоварването на актуаторите M1 M2 и M3 на всяка една от кинематичните вериги е представено на фиг.5.56. вижда се, че за постигане на скорост, актуаторите на робота трябва да осигуряват поне 8 [Nm] въртящ момент за задвижване на звената. На фиг.5.57 е представено натоварването в става R-1, а на фиг.5.58 натоварването на сферичната става S-1. В табл.5.9 са представени максималните резултатни натоварвания на всички стави при реализация на тази осцилация, чието изменение е аналогично на фиг.5.57 и фиг.5.58.



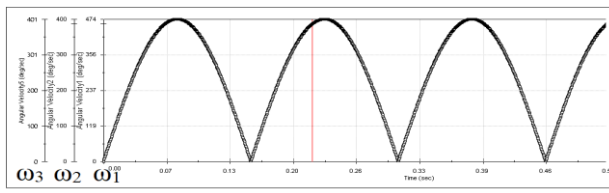
Фиг.5.41. Изменение на θ_1 при реализация на движението



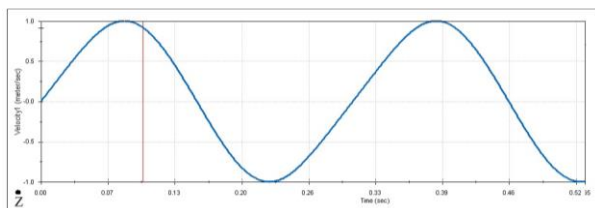
Фиг.5.43. Изменение на θ_3 при реализация на движението



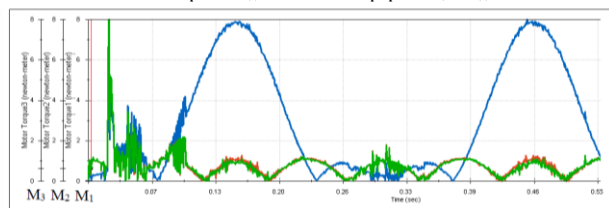
Фиг.5.42. Изменение на θ_2 при реализация на движението



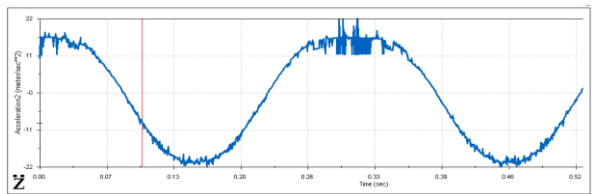
Фиг.5.44. Ъглова скорост на задвижващите звена при реализация на движението



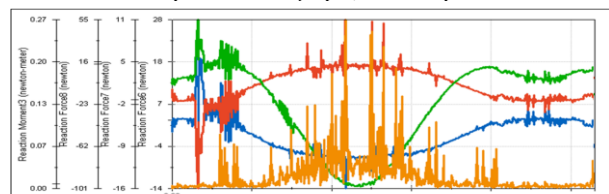
Фиг.5.45 - транслационна скорост от подвижната платформа при реализация на движението.



Фиг.5.47 – максимален въртящ момент на актуаторите, необходим за реализация на движението



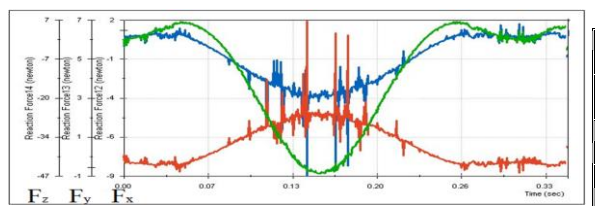
Фиг.5.46. Транслационно ускорение постигнато от подвижната платформа при реализация на движението



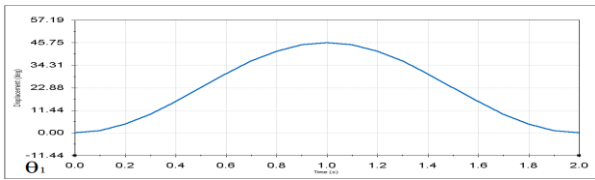
Фиг.5.48. Натоварване в става R-1 при реализация на движението

Табл.5.8. Резултати от динамичен анализ без външно натоварване

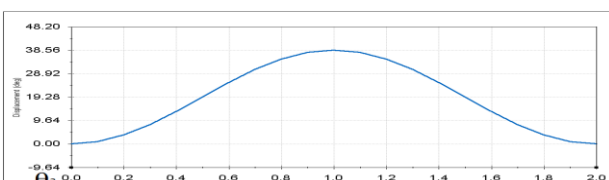
Става\Натоварване	M _T [Nm]	F _x [N]	F _y [N]	F _z [N]
R-1	0.27	28	16	101
RP - 2	1.0	60	35	95
S - 1	-	9	7	47
S - 2	-	12	5	42
S - 3	-	9	6	43
S - 4	-	12	5	42
RP - 3	0.8	18	10	83



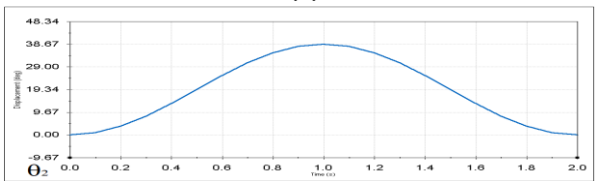
Фиг.5.49. Натоварване в става S-1 при реализация на движението



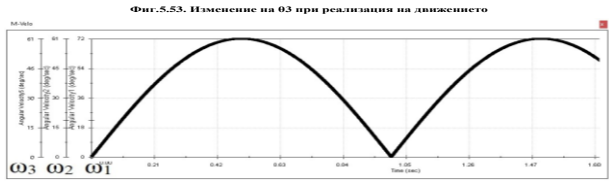
Фиг.5.51. Изменение на θ_1 при реализация на движението



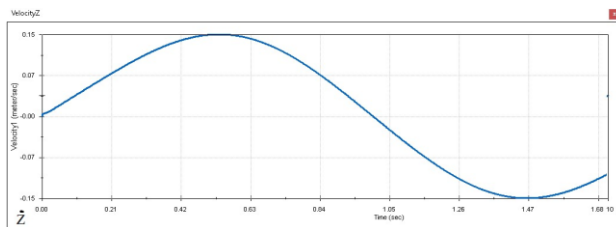
Фиг.5.53. Изменение на θ_3 при реализация на движението



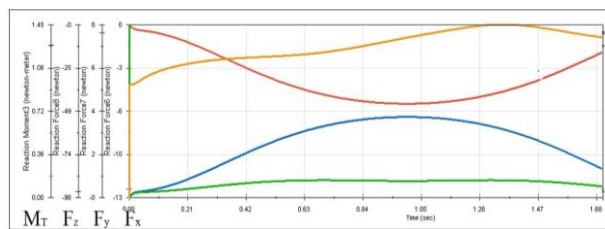
Фиг.5.52. Изменение на θ_2 при реализация на движението



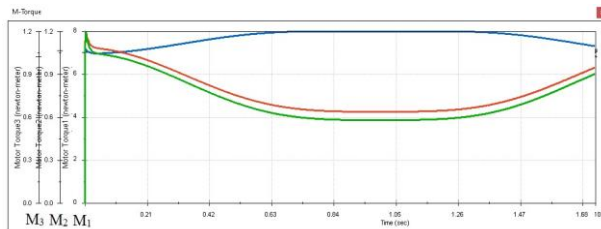
Фиг.5.54. Ъглова скорост на задвижващите звена при реализация на движението



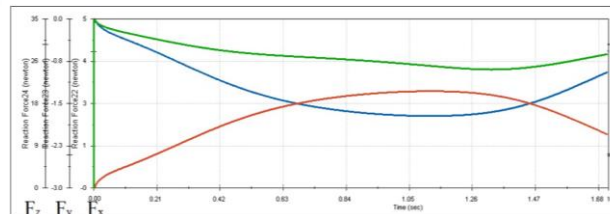
Фиг.5.55. Транслационна скорост на К.П.3 по z



Фиг.5.57. Натоварване в става R-1 при реализация на движението



Фиг.5.56. Максимален въртящ момент на актуаторите, необходим за реализация на движението



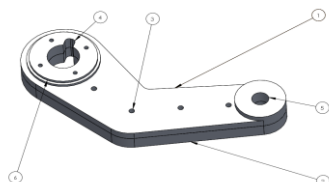
Фиг.5.58. Натоварване в става S-1 при реализация на движението

Табл.5.9. Резултати от динамичен анализ с външно натоварване

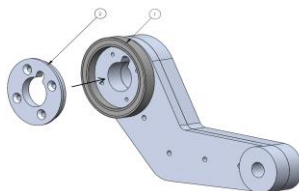
Става \ Натоварване	Mt [Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]
R-1	1.45	13	8	98
RP - 2	1.0	13	8	95
S - 1	-	5	3	35
S - 2	-	8	5	60
S - 3	-	8	5	59
S - 4	-	5	3	35
RP - 3	1.2	13	8	91

5.4.8. Проектиране на структурни единици

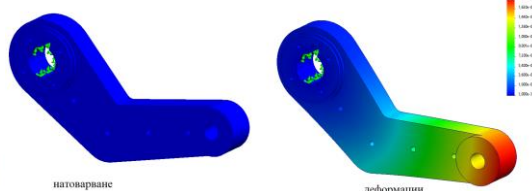
Функциите които трябва да изпълнява статичната платформа са: да осигурява разположението на кинематичните вериги, да осигурява лагеруването на ротационната става на горното звено на кинематичната верига, да осигурява монтажа на актуаторите и куплирането им към задвижваните звена на кинематичните вериги. Удачно е, процеса на проектиране, да започне чрез избор на стандартните изделия като актуатори и лагери спрямо дефинираните параметри от вече извършените изследвания.



Фиг.5.60. Горно задвижвано звено на кинематичната верига

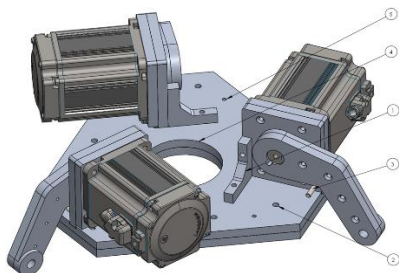


Фиг.5.61. Лагеруване на горно задвижвано звено на кинематичната верига

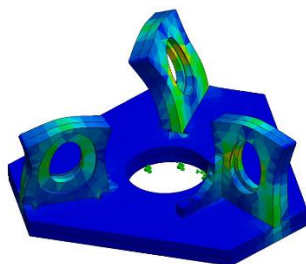


Фиг.5.64. Симулация на натоварването – отляво вътрешните напрежения, отдясно деформациите

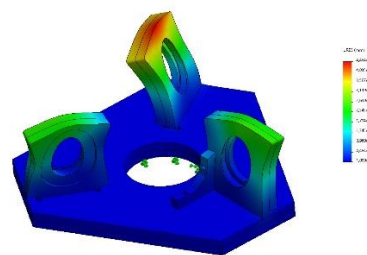
На фиг.5.64 е представена симулация на детайлите с приложени усилия дефинирани при статичния и динамичния анализ. Ясно се вижда, че при натоварването липсват червени зони на прекомерна концентрация на напрежения, а деформациите са минимални 0,02 [mm]. Следователно конструкцията ще издържи. Теглото на звеното е 0.32 [kg], което е плюс тъй като е малко по-леко от приетите стойности при динамичния анализ. Платформата е изградена от две сдвоени плочи поз.1 и поз.2 фиг. 5.65 с цел достигане на необходимата якост.



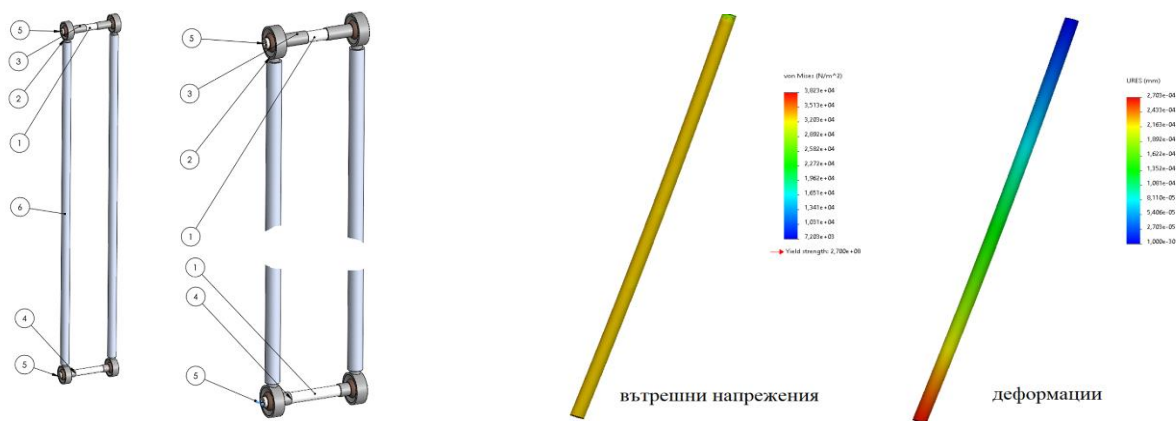
Фиг.5.66. Конструкция на неподвижната платформа с монтирани задвижващи възли



Напрежения в конструкцията при подлагане на натоварване

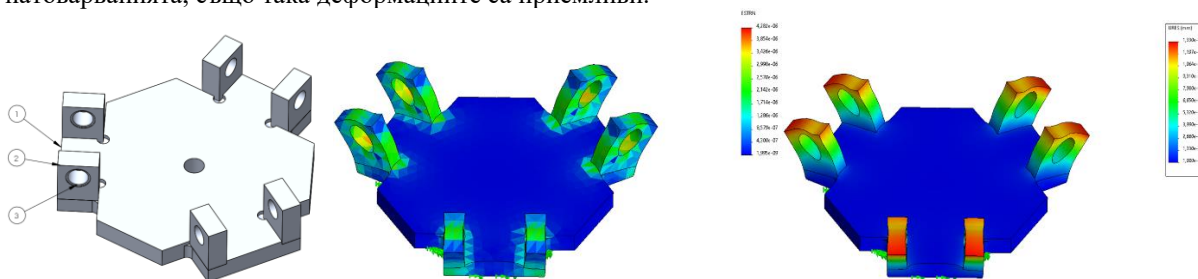


Късата страна на шарнирния четиризвенец е от стандартна стоманена ос Misumi-SFMRW10-97-M5-N5 поз.1 фиг. 5.69 върху която са нанизани сферичните накрайници Igus-KARM-10-CL-J поз.2.



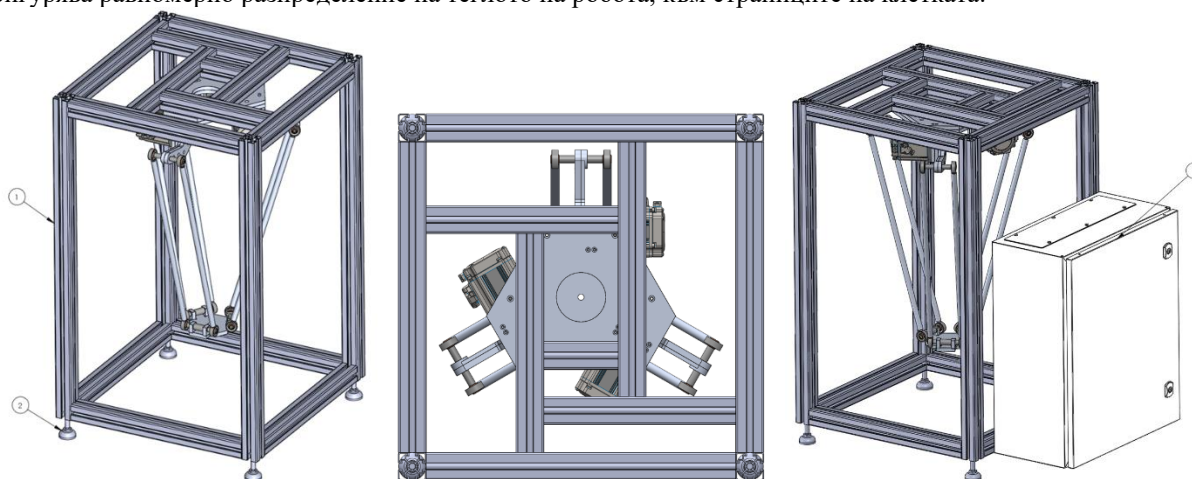
Фиг.5.69. Реализация на паралелограмното звено на кинематичната верига **Фиг.5.72.** Симулация на натоварването

Подвижната платформа е съставена от основна плоча поз.1 фиг.5.73 изработена от алуминий EN AW 1080. Към нея са монтирани 6 шарнирни конзоли поз.2, които служат за монтаж на платформата към паралелограмите на кинематичните вериги, чрез отворите поз.3. На фиг.5.75 и фиг.5.76 е представен резултата от симулацията. Вижда се, че няма зони на концентрация на критични напреженията където се превишават на натоварванията, също така деформациите са приемливи.



Фиг.5.73. Подвижна платформа **Фиг.5.75.** Напрежения в платформата при подлагане на натоварване **Фиг.5.76.** Деформации в платформата при подлагане на натоварване

Клетката при „Делта“ роботите от висящ тип служи за позициониране на робота над обектите върху които ще извършва операции. Клетката поз.1 фиг.5.77 е изработена от стандартни алуминиеви конструкционни профили с размер 45x4 на фирма Rexroth. Неподвижната платформа се монтира към профилите на клетката посредством болтове и гайки влизащи в каналите на профила. Петите поз.2 слъжат за нивелиране на конструкцията. Особеност в клетката е реализацията на тавана на клетката фиг.5.78, която осигурява равномерно разпределение на теглото на робота, към страниците на клетката.



Фиг.5.77. Клетка на робота **Фиг.5.78.** Реализация на тавана на клетката осигуряващ равномерно разпределение на товара **Фиг.5.81.** Разположение на електрическото табло

5.5. Изводи

Като следствие от направените проектирания и разработки по предложената методика, могат да се направят следни изводи:

- Разработената методика е бърза и води до добри резултати.
- Използването на среда за компютърно моделиране при изготвяне на анализите, прави процеса интерактивен и нагледен.

- Като недостатък може да се отбележи, че резултатът от процеса по анализ на симулациите, до голяма степен зависи от начина на задаване на входните параметри на системата, като в определени случаи се налага опростяване на модела.
- Степента на опростяване, както и начина на подаване на входните параметри е строго специфичен за дадения механизъм и не може да се генерализира.
- Също трябва да се отбележи, че в определени моменти, при използването на тази методика, се залага съществено до нюха и опита на конструктора, за това да се определи степента на акуратност на резултатните данни от извършените анализи.
- За техническата част, може да се каже, че разработените конструкции са прости и технологични, не перфектни, но са оптималния вариант спрямо ограниченията от гледна точка на задание, материали, технологии за изработка и бюджет.

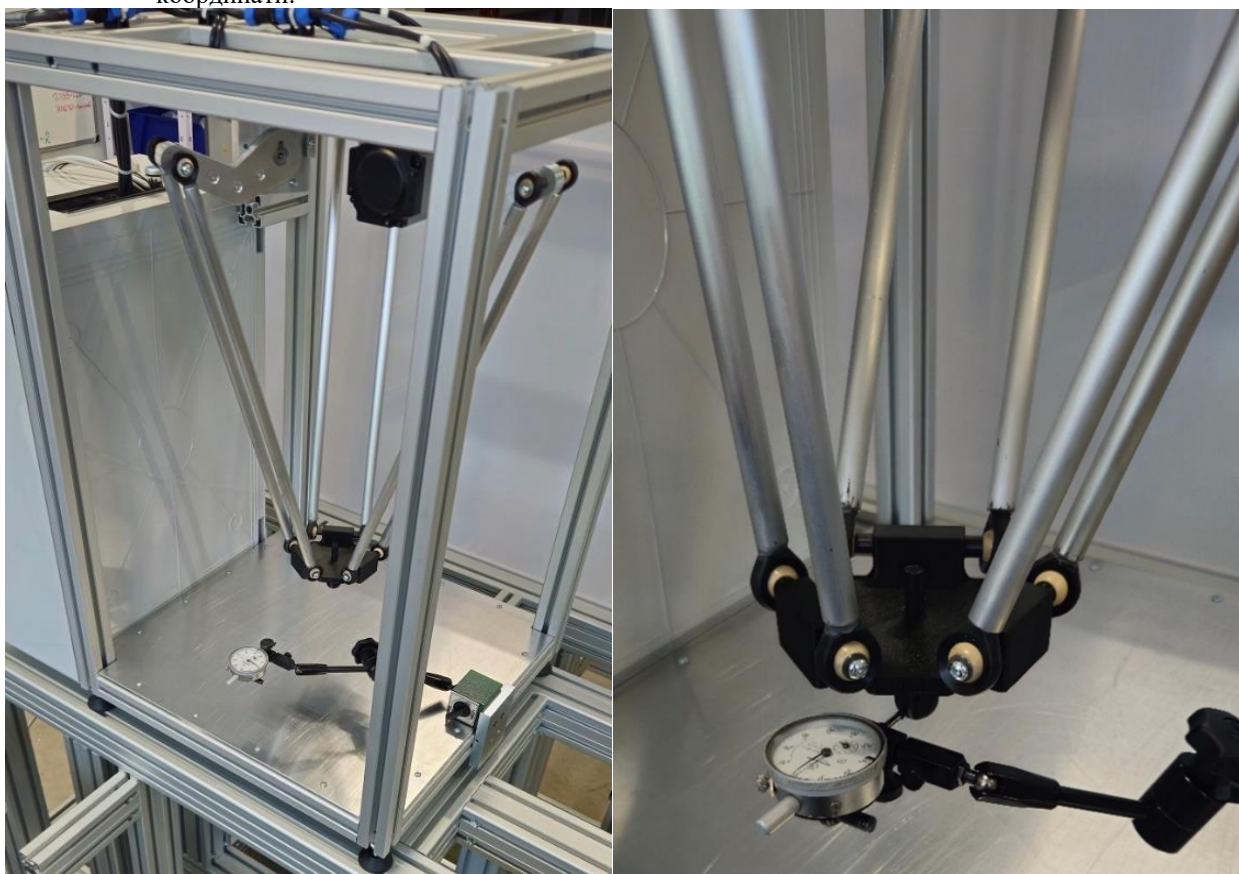
ГЛАВА 5 - РАЗРАБОТВАНЕ НА ДЕЛТА РОБОТ С ИНТЕГРИРАН ОРИЕНТИРАЩ МОДУЛ

В тази глава са направени реални технически изследвания на проектираните механизми, като е изработен реален прототип на проектирания робот с паралелна кинематика и са сглобени изграждащите го структурни компоненти. Целта е да се изследва точността на позициониране на новосъздадения робот и по този начин да се валидират направените проектирания.

6.1. Изследване на точността на позициониране на робота

При този анализ се определя точността на позициониране на робота. За индустриалните работи един от най-важните параметри е точността на позициониране. За целта изследването е разделено на 3 етапа – повторимост по ос X, по ос Y и по ос Z. Прототипа на робота, част от установката за изследване е представен на фиг.6.1 и фиг.6.2. Грешката в изменението на позицията се измерва чрез индикаторен часовник. Изследването протича по следния начин:

- Избира се произволна точка начална от работното пространство, в която се позиционира платформата.
- Индикаторния часовник се нулира, контактувайки с контактната сфера на подвижната платформа, като петата на часовника трябва да е успоредна на координатната ос, която се изследва.
- Платформата се придвижва до друга произволна точка от работното пространство, след което се връща до началната точка.
- С индикаторния часовник се измерва отклонението от позицията на началната точка.
- Преместването до произволна точка, връщането до началната точка и измерването на отклонението се повтаря 10 пъти, като всеки път произволните точки са със различни координати.

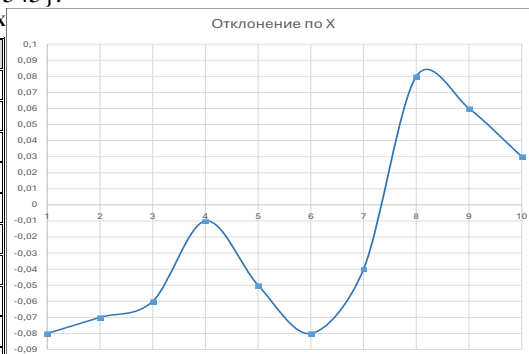


Фиг.6.1. Изследване точността на позициониране

Резултатите от изследването за повторяемост по ос X са представени в табл.6.1 по ос Y, в табл. 6.2 и по ос Z в табл.6.3, както и в графичен вид за повторяемост по ос X на фиг.6.3, по ос Y на фиг.6.4 и по ос Z на фиг.6.5. При изследване на повторяемост по ос Y е избрана начална точка {-50, -160, -570}. При изследване на повторяемост по ос Z е избрана начална точка {-50, -150, -545}.

Табл. 6.1. Резултати за повторяемост по ос X

No.	Междина позиция P {x, y, z} [mm]	Отклонение Δ [mm]
1	{10, 45, -560}	-0.08
2	{60, -30, -590}	-0.07
3	{-100, 100, -545}	-0.06
4	{100, 100, -600}	-0.01
5	{0, 0, -545}	-0.05
6	{200, -120, -535}	-0.08
7	{250, -5, -550}	-0.04
8	{-5, -250, -630}	0.01
9	{-148, 150, -540}	0.06
10	{0, 0, -665}	0.03



Фиг.6.3. Отклонение на позицията по ос X след всеки цикъл

Табл. 6.2. Резултати за повторяемост по ос Y

No.	Междина позиция P {x, y, z} [mm]	Отклонение Δ [mm]
1	{10, 40, -570}	-0.06
2	{60, -40, -600}	-0.08
3	{100, 100, -565}	0.05
4	{-150, -100, -530}	0.07
5	{200, -120, -535}	0.09
6	{250, 5, -550}	0.01
7	{-5, 240, -580}	0.05
8	{0, 0, -665}	0.03
9	{0, 0, -665}	0.02
10	{-100, 100, -640}	-0.07



Фиг.6.4. Отклонение на позицията по ос Y след всеки цикъл

Табл. 6.3. Резултати за повторяемост по ос Z

No.	Междина позиция P {x, y, z} [mm]	Отклонение Δ [mm]
1	{0, 0, -530}	-0.01
2	{-100, 100, -540}	0.08
3	{100, -100, -570}	0.09
4	{-158, -10, -570}	-0.04
5	{200, -120, -535}	-0.05
6	{-148, 150, -540}	0.06
7	{60, -40, -590}	0.09
8	{0, 0, -665}	0.03
9	{5, -200, -620}	-0.07
10	{-80, -80, -630}	0.08



Фиг.6.5. Отклонение на позицията по ос Z след всеки цикъл

6.2. Изводи

След направените реални измервания, ясно се вижда, че отклонението от позицията на робота, след няколко цикъла на репозициониране остава в границите ± 0.1 [mm], във всяко едно направление от пространството. Следователно търсената точност на робота, спрямо заданието е постигната и конструкцията може да бъде успешно валидирана.

НАУЧНО ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Научно-приложни приноси

- Разработена е класификация на съществуващите работи с паралелна кинематика, като основна характеристика е влиянието на кинематиката и конструкцията на робота, върху степените на свобода на крайното изпълнително звено.
- Разработена е методика за проектиране на работи с паралелна кинематика, включваща десет етапа със съответните взаимовръзки между тях.
- Създадена е конструкция на принципно нов ориентиращ модул за специализиран робот с паралелна кинематика.

Приложни приноси

- Разгледани и анализирани са роботите с паралелна кинематика, с техните предимства, недостатъци, трудности и проблеми при проектиране.
- Разработената методика е валидирана чрез проектиране на специализиран робот с паралелна кинематика с допълнителен ориентиращ модул.
- Създаден е прототип на проектирания специализиран робот с паралелна кинематика, като е разработено програмно управление, електрическа схема и техническа документация.
- Извършени са експериментални изследвания, като са анализирани получените резултати.
- Резултатите от разработването на дисертационният труд могат да се приложат, както за реални изследвания и демонстрация в учебния процес, така и за проектиране на работи с паралелна кинематика в различни производствени процеси.

Използвана литература:

1. Малаков И. и колектив, Комплексна автоматизация на дискретното производство, издателство на ТУ София, ISBN 978-619-167-153-3, 2015
2. Николов Ст. и колектив, Комплексна автоматизация на дискретното производство, издателство на ТУ София, ISBN 978-619-167-153-3, 2020
3. Павлов В., Проектиране на промишлени роботи, 1993.
4. Цолов С., К. Йорданов, А. Йорданов, Проектиране на автоматизиран комплекс за игра на шах, XXVIII МНТК „АДП – 2019”, Созопол, 29.06 – 02.07.2019 г., Списание „Автоматизация на дискретното производство”, бр.1/юли 2019г., ISSN: 2682-9584, (182-187).
5. Цолов С., Класификация на работи с паралелна кинематика, XXX МНТК „АДП – 2021”, Созопол, 29.06 – 02.07.2021 г., Списание „Автоматизация на дискретното производство”, бр.3/юли 2021 г., ISSN: 2682-9584, (17-24).
6. Цолов С., Р. Димитрова, Проектиране на паралелен Delta робот, XXVIII МНТК „АДП – 2019”, Созопол, 29.06 – 02.07.2019 г., Списание „Автоматизация на дискретното производство”, бр.1/юли 2019г., ISSN: 2682-9584, (92-98).
7. Цолов С., Р. Димитрова, С. Николов, Разработване на ориентиращ модул за паралелен делта робот, XXXII МНТК „АДП – 2023”, Созопол, 29.06 – 02.07.2023 г., Списание „Автоматизация на дискретното производство”, бр.5/юли 2023 г., ISSN: 2682-9584, (27-33).
8. Цолов С., Р. Димитрова, С. Николов, Сравнителен анализ на алгоритми за проектиране на работи с паралелна кинематика, XXXI МНТК „АДП – 2022”, Созопол, 29.06 – 02.07.2022 г., Списание „Автоматизация на дискретното производство”, бр.4/юли 2022 г., ISSN: 2682-9584, (113-119).
9. Цолов С., Разработване на методика за проектиране на работи с паралелна кинематика, XXXI МНТК „АДП – 2022”, Созопол, 29.06 – 02.07.2022 г., Списание „Автоматизация на дискретното производство”, бр.4/юли 2022 г., ISSN: 2682-9584, (109-112).
10. Чакърски Д., Т. Вакарелска, В. Станков, А. Райков. Промислени работи, роботизирани технологични модули и системи. Част 1 и 2. София, Издателство на ТУ, 2003.
11. Чакърски Д., Т. Вакарелска. Автоматизиращи устройства. София, Издателство на ТУ, 2008.
12. Angeles J., The robust design of parallel manipulators. In 1st Int. Colloquium, Collaborative Research Centre 562, pages 9–30, Braunschweig, May 29-30, 2002.
13. Bhattacharya S., Hatwal H., Ghosh A., On the optimum design of a Stewart platform type parallel manipulators. *Robotica*, 13(2):133 - 140, March - April 1995.
14. Bhattacharya S., Hatwal H., Ghosh A., On the optimum design of a Stewart platform type parallel manipulators. *Robotica*, 13(2):133 - 140, March - April 1995.
15. Bonev I., Delta Parallel Robot — the Story of Success, May 6, 2001.
16. Bonev I., The True Origins of Parallel Robots, January 24, 2003.
17. Bonev I.A., Zlatanov D., and Gosselin C. Singularity analysis of 3 dof planar mechanisms via screw theory. *ASME J. of Mechanical Design*, 125(3):573–581, September 2003.
18. Byun Y.K., Cho H-S., Analysis of a novel 6-dof, 3-PPSP parallel manipulator. *Int. J. of Robotics Research*, 16(6):859–872.
19. Chang-Soo Han; J.C. Hudgens; D. Tesar; A.E. Traver, Modeling, synthesis, analysis, and design of high resolution micromanipulator to enhance robot accuracy, Osaka, November, 3-5, 1991
20. Carretero J. A. and others . Kinematic analysis of a three-dof parallel mechanism for telescope applications. In ASME Design Engineering Technical Conference, pages DETC97/DAC-3981, Sacramento, September, 14-17, 1997.
21. Ceccarelli M. and Carbone G. Numerical and experimental analysis of the stiffness performances of parallel manipulators. In 2nd Int. Colloquium, Collaborative Research Centre 562, pages 21–36, Braunschweig, May, 10-11, 2005.
22. Chablat D., Wenger P., Majou F., and Merlet J-P. An interval analysis based study for the design and the comparison of three-degrees-of- freedom parallel kinematic machine. *Int. J. of Robotics Research*, 23(6):615–624, 2004.
23. Chiacchio P., Pierrot F., Sciavicco L., and Siciliano B. Robust design of independant joint controllers with experimentation on a high-speed parallel robot. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 40(4):393–403, August 1993.
24. Claudinon B., Lievre J., Test facility for rendez-vous and docking. In 36th Congress of the IAF, pages 1–6, Stockholm, October 7-12, 1985.
25. Clavel R. and others . High precision parallel robots for micro-factory applications. In 2nd Int. Colloquium, Collaborative Research Centre 562, pages 285–296, Braunschweig, May, 10-11, 2005.
26. Clavel R., DELTA, a fast robot with parallel geometry. In 18th Int. Symp. on Industrial Robot, pages 91–100, Lausanne, April 26-28, 1988.
27. Collins C.L., Long G.L., The singularity analysis of an in-parallel hand controller for force-reflected teleoperation. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 11(5):661–669, October 1995.
28. Company O., Marquet F., and Pierrot F. A new high speed 4-dof parallel robot. Synthesis and modeling issues. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 19(3):411–420, June 2003.
29. Company O., Marquet F., Pierrot F., A new high speed 4-dof parallel robot. Synthesis and modeling issues. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 19(3):411–420, June 2003.
30. Dafaoui M., Amirat Y., Pontnau J., and Francois C. Analysis and design of a six-dof parallel manipulator, modeling, singular configurations and workspace. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 14(1):78–92, February 1998.
31. Daney D. Optimal measurement configurations for Gough platform calibration. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pages 147–152, Washington, May, 11-15, 2002.
32. Di Gregorio R. Dynamic performance indices for 3-dof parallel manipulators. In ARK, pages 11–20, Caldes de Malavalla, June 29- July 2, 2002.
33. Du Plessis L.J. and Snyman J.A. Design and optimum operation of a reconfigurable planar Gough-Stewart machining platform. In 3rd Chemnitz Parallelkinematik Seminar, pages 729–749, Chemnitz, April, 23-25, 2002.
34. Ebert-Uphoff I., Gosselin C.M., Kinematic study of a new type of spatial parallel platform mechanism. In ASME Design Engineering Technical Conferences, Atlanta, September 13-16, 1998.
35. Ebert-Uphoff I., Lee J-K., and Lipkin H. Characteristic tetrahedron of wrench singularities for parallel manipulators with three legs. *Proc. Instn Mech Engrs, Part C: J. Mechanical Engineering Science*, 216(1):81–93, January 2002.

36. Erdman A.G., *Modern Kinematics*. Wiley, New-York, 1993 ISBN-13: 978-0471554592.
37. Gao F. and others . New kinematic structures for 2-,3-,4- and 5- dof parallel manipulator designs. *Mechanism and Machine Theory*, 37(11):1395–1411, November 2002.
38. Geng Z. and Haynes L.S. A 3-2-1 kinematic configuration of a Stewart platform and its application to six degree of freedom pose measurements. *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, 11(1):23–34, March 1994.
39. Gosselin C. and Wang J. Singularity loci of planar parallel manipulators with revolute actuators. *Robotics and Autonomous Systems*, 21(4):377–398, October 1997.
40. Gosselin C. Kinematic analysis optimization and programming of parallel robotic manipulators. Ph.D. Thesis, McGill University, Montreal, June 15, 1988.
41. Gosselin C., Kinematic analysis optimization and programming of parallel robotic manipulators. Ph.D. Thesis, McGill University, Montreal, June 15, 1988.
42. Gosselin C., Lavoie E., and Toutant P. An efficient algorithm for the graphical representation of the three-dimensional workspace of parallel manipulators. In *22nd Biennial Mechanisms Conf.*, pages 323–328, Scottsdale, September, 13-16, 1992.
43. Gosselin C., Schreiber L., *Kinematically Redundant Spatial Parallel Mechanisms for Singularity Avoidance and Large Orientational Workspace*, ISSN: 1941-0468.
44. Gosselin C., Stiffness mapping for parallel manipulators. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, ISSN: 2374-958X 6(3):377–382, June 1990.
45. Gosselin C.M. and Wang J. Static balancing of spatial six-degree-of-freedom parallel mechanisms with revolute actuators. *J. of Robotic Systems*, 17(3):159–170, 2000.
46. Hayes M.J.D. and Zsombor-Murray P.J. Inverse kinematics of a planar manipulator with holonomic higher pairs. In *ARK*, pages 59–68, Strobl, June 29- July 4, 1998.
47. Herve J.M., Group mathematics and parallel link mechanisms. In *9th. World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*, pages 2079–2082, Milan, August 30- September 2, ISBN: 978-1-4471-0765-1.
48. Hiller M. and others . Design, analysis and realization of tendon-based parallel manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, 40(4):429–445, April 2005.
49. Hong K-S. Kinematic optimal design of a new parallel-type rolling mill: paramill. *Advanced Robotics*, 17(9):837–862, 2003.
50. Huang T. and others . Determination of closed form solution to the 2-D orientation workspace of Gough-Stewart parallel manipulators. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 15(6):1121–1125, December 1999
51. Huang T., Zhao X., and Whitehouse D.J. Stiffness estimation of a Tripod-based parallel kinematic machine. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 18(1):50–58, February 2002.
52. Hunt K.H. Geometry of robotics devices. *Mechanical Engineering Transactions*, 7(4):213–220, 1982.
53. Hunt K.H., Structural kinematics of in parallel actuated robot arms. *J. of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, 105(4): 705–712, March 1983.
54. Husty M., Mielczarek S., and Hiller M. Redundant spatial Stewart- Gough platform with a maximal forward kinematic solution set. In *ARK*, pages 147–154, Caldes de Malavalla, June 29- July 2, 2002.
55. Innocenti C. and Parenti-Castelli V. Analytical form solution of the direct kinematics of a 4-4 fully in-parallel actuated six degree-of- freedom mechanism. In *9th RoManSy*, pages 41–50, Udine, 1992.
56. Jafari F. and McInroy J.E. Orthogonal Gough-Stewart platforms for micromanipulation. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 19(4):595–603, August 2003.
57. Jeong J.I. and others . Kinematic calibration for redundantly actuated parallel mechanisms. *ASME J. of Mechanical Design*, 126(2):307–318, March 2004.
58. Kang B., Yeung B., and Mills J.K. Two-time scale controller design for a high speed planar parallel manipulator with structural flexibility. *Robotica*, 20(5):519–528, September 2002.
59. Kassner D.J. Kinematics analysis of a planar three-degree-of-freedom platform-type robot manipulator. Master's thesis, Purdue University, Purdue, December 1990.
60. Kawamura S. and others . Development of an ultrahigh speed robot FALCON using wire drive system. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 215–220, Nagoya, May, 25-27, 1995.
61. Kim D., W. Chung, and Youm Y. Analytic jacobian of in-parallel manipulators. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 2376–2381, San Francisco, April, 24-28, 2000.
62. Kohli D., Lee S-H, Tsai K-Y, Sandor G.N., Manipulator configurations based on Rotary-Linear (R-L) actuators and their direct and inverse kinematics. *J. of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, 110:397–404, December 1988.
63. Kong X. and Gosselin C.M. Kinematics and singularity analysis of a novel type of 3-CRR 3-dof translational parallel manipulator. *Int. J. of Robotics Research*, 21(9):791–798, September 2002.
64. Lambert M., Polyarticulated retractile mechanism, United States Societe Becart S.A. March, 24, 1987.
65. Landsberger S.E., Sheridan T.B., A minimal, minimal linkage: the tension-compression parallel link manipulator. In *IMACS/SICE Int. Symp. on Robotics, Mechatronics, and Manufacturing Systems*, pp 493–500, Kobe, September 16-20, 1992.
66. Lin W., Duffy J., and Griffis M. Forward displacement analysis of the 4-4 Stewart platform. *ASME J. of Mechanical Design*, 114(3):444–450, September 1992.
67. Liu G.F. and others, Analysis and control of redundant parallel manipulators. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 3748–3754, Seoul, May 23-25, 2001.
68. Liu K., Lewis F., Lebre G., and Taylor D. The singularities and dynamics of a Stewart platform manipulator. *J. of Intelligent and Robotic Systems*, 8:287–308, 1993.
69. Maw I., *The What, Why and How of Delta Robots*.
70. Mayer St-Onge B., Gosselin C.M., Singularity analysis and representation of the general Gough-Stewart platform. *Int. J. of Robotics Research*, 19(3):271–288, March 2000 ISSN: 1741-3176.
71. Merkle R.C., *A new family of six degree of freedom positional devices*, 1994.
72. Merlet J. P., *Parallel Robots (Second Edition) 2006*, INRIA, Sophia-Antipolis, France, ISBN-10 1-4020-4132-2.
73. Merlet J.P., Articular velocities of parallel manipulators, Part II: Finding all the robots with fixed extremal articular velocity for performing a fixed cartesian velocity over a whole workspace ISBN:0-7803-3612-7.
74. Merlet J.P., *Designing a parallel manipulator for a specific workspace INRIA Sophia-Antipolis*, April 1995 ISSN 0249-6399.

75. Merlet J.P., Efficient estimation of the extremal articular forces of a parallel manipulator in a translation workspace. In IEEE Int. Conf on Robotics and Automation, Louvain, May 18-20, pp 1982–1987.
76. Merlet J-P. Efficient computation of the extremum of the articular velocities of a parallel manipulator in a translation workspace. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pages 1976–1981, Louvain, May, 18-20, 1998
77. Merlet J-P. Efficient estimation of the extremal articular forces of a parallel manipulator in a translation workspace. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pages 1982–1987, Louvain, May, 18-20, 1998.
78. Merlet J-P. Trajectory verification in the workspace for parallel manipulators. *Int. J. of Robotics Research*, 13(4):326–333, August 1994.
79. Ming A. and Higuchi T. Study on multiple degree of freedom positioning mechanisms using wires, Part 2, Development of a planar completely restrained positioning mechanism. *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.*, 28(3):235–242, September 1994.
80. Mourrain B. The 40 generic positions of a parallel robot. In Bronstein M., editor, ISSAC'93, ACM press, pages 173–182, Kiev (Ukraine), July 1993.
81. Nakamura Y. and Ghodoussi M. Dynamics computation of closedlink robot mechanisms with nonredundant and redundant actuators. 364 REFERENCES *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 5(3):294–302, June 1989.
82. Nanua P., Waldron K.J., Direct kinematic solution of a Stewart platform. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 6(4):438–444 ISSN: 1042-296X30-511.
83. Nenchev D.N. and Uchiyama M. Singularity-consistent path planning and control of parallel robot motion through instantaneous-selfmotion type. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pages 1864–1870, Minneapolis, April, 24-26, 1996.
84. Nikolov S., R. Dimitrova, S. Tsolov, L. Dimitrov, Classification of parallel kinematics robots, EEPES 2023, AIP Conf. Proc. 3063, 060001 (2024), <https://doi.org/10.1063/5.0195795>
85. Pierrot F., Robots Pleinement Paralleles Legers: Conception Modelisation et Commande. Ph.D. Thesis, Universit'e Montpellier II, Montpellier, April 24, 1991.
86. Sayapin S.N. Application of parallel kinematics machines for active vibration isolation and pointing of high-precision large deployable space structure (HLDSS). 3rd Chemnitzer Parallelkinematik Seminar, pages 957–962, Chemnitz, April, 23-25, 2002.
87. Sefrioui J., Gosselin C., Singularity analysis and representation of planar parallel manipulators. *Robotics and Autonomous Systems* 1992 Vol. 10 pp 209-224.
88. Sefrioui J., Gosselin C.M., On the quadratic nature of the singularity curves of planar three-degree-of-freedom parallel manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, 30(4):533–551, May 1995.
89. Shirkhodaie A.H. and Soni A.H. Forward and inverse synthesis for a robot with three degree-of-freedom. In 19th Summer Computer Simulation Conf., pages 851–856, Montr'eal, July, 27-30, 1987.
90. Tanev T., Geometric Algebra Approach to Singularity of Parallel Manipulators with Limited Mobility - Advances in Robot Kinematics, ISBN-13: 978-1-4020-8599-4, 2008 pages 39 -49.
91. Tanev T.K., Forward displacement analysis of a three legged fourdegree- of-freedom parallelmanipulator. InARK, pages 147–154, Strobl, June 29- July 4, 1998.
92. Wen K., Kinematically Redundant (6+3)-DOF Hybrid Parallel Robot with Large orientational ISBN:978-1-5386-6027-0.
93. Wendlandt J.M. and Sastry S.S. Design and control of a simplified Stewart platform for endoscopy. In 33nd Conf. on Decision and Control, pages 357–362, Lake Buena Vista, December, 14-16, 1994.
94. Williams II R.L. and Hexter E.R. Maximizing kinematic motion for a 3-dof VGT module. *ASME J. of Mechanical Design*, 120(2):333–336, June 1998.
95. Williams R., The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions II, Ph.D., Mechanical Engineering, Ohio University, October 2016.
96. Wohlhart K. Mobile 6-SPS parallel manipulators. *J. of Robotic Systems*, 20(8):509–516, 2003.
97. Wu G., Conceptual Design and Analysis of a 6-Axis Double Delta Robot Towards High Acceleration - Dalian University of Technology.
98. Yoon W-K. and others . Stiffness analysis and design of a compact modified Delta parallel mechanism. *Robotica*, 22(5):463–475, September 2004.
99. Zanganeh K.E. and Angeles J. Kinematic isotropy and the optimum design of parallel manipulators. *Int. J. of Robotics Research*, 16(2):185–197, April 1997.
100. Zhuang H. and Wang Y. A coordinate measuring machine with parallel mechanisms. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pages 3256–3261, Albuquerque, April, 21-28, 1997.
101. Zlatanov D. and Gosselin C.M. A family of new parallel architectures with four degrees of freedom. In F.C. Park C.C. Iurascu, editor, *Computational Kinematics*, pages 57–66. EJCK, May, 20-22, 2001.
102. Zlatanov D., Fenton R.G., Benhabib B., A unifying framework for classification and interpretation of mechanism singularities. *ASME J of Mechanical Design*, 117(4):566–572, December 1995.
103. Zoppi M., Bruzzone L.E., and Molfino R.M. A novel 5-dof interconnected- chains PKM for manufacturing revolute surfaces. In 4th Chemnitzer Parallelkinematik Seminar, Chemnitz, April, 20-21, 2004.
104. Zoppi M., Bruzzone L.E., Molfino R.M., A novel 5-dof interconnected- chains PKM for manufacturing revolute surfaces. In 4th Chemnitzer Parallelkinematik Seminar, Chemnitz, April 20-21, 2004.
105. Zubizarreta A., Cabanes L., Marcos M., Pinto C., Corral J., Bengoa P., Redundant dynamic modelling procedure based on extra sensors for parallel robot control, ISBN 978-1-63485-953-0.
106. <https://industrial.omron.eu/>
107. <https://meanwell.bg/>
108. <https://meau.com>
109. <https://new.abb.com/>
110. <https://store.arduino.cc/>
111. <https://www.fanuc.eu/bg/en>
112. <https://www.festo.com/>
113. <https://www.igus.bg/>
114. <https://www.intermodalics.eu/blog-on-robotic-software/understanding-kinematics-the-key-to-controlling-your-robot>
115. <https://www.mecademic.com/>

СПИСЪК С ПУБЛИКАЦИИТЕ

1. Цолов С., Р. Димитрова, ПРОЕКТИРАНЕ НА ПАРАЛЕЛЕН DELTA РОБОТ, XXVIII МНТК „АДП – 2019”, Созопол, 29.06 – 02.07.2019 г., Списание „Автоматизация на дискретното производство”, бр.1/юли 2019г., ISSN: 2682-9584, (92-98).
<https://mf.tu-sofia.bg/mntkadp/includes/archive/2019.pdf>
2. Цолов С., К. Йорданов, А. Йорданов, ПРОЕКТИРАНЕ НА АВТОМАТИЗИРАН КОМПЛЕКС ЗА ИГРА НА ШАХ, XXVIII МНТК „АДП – 2019”, Созопол, 29.06 – 02.07.2019 г., Списание „Автоматизация на дискретното производство”, бр.1/юли 2019г., ISSN: 2682-9584, (182-187).
<https://mf.tu-sofia.bg/mntkadp/includes/archive/2019.pdf>
3. Цолов С., КЛАСИФИКАЦИЯ НА РОБОТИ С ПАРАЛЕЛНА КИНЕМАТИКА, XXX МНТК „АДП – 2021”, Созопол, 29.06 – 02.07.2021 г., Списание „Автоматизация на дискретното производство”, бр.3/юли 2021 г., ISSN: 2682-9584, (17-24).
<https://mf.tu-sofia.bg/mntkadp/includes/archive/2021.pdf>
4. Димитров С., Р. Димитрова, Т. Банков, А. Банчев, С. Цолов, ПРОЕКТИРАНЕ НА МОБИЛЕН РОБОТ С ХИБРИДНО ЗАДВИЖВАНЕ, XXX МНТК „АДП – 2021”, Созопол, 29.06 – 02.07.2021 г., Списание „Автоматизация на дискретното производство”, бр.3/юли 2021 г., ISSN: 2682-9584, (114-121).
<https://mf.tu-sofia.bg/mntkadp/includes/archive/2021.pdf>
5. Dimitrov S., R. Dimitrova, T. Bankov, A. Banchev, S. Tsolov, ENGINEERING RESEARCH A MOBILE ROBOT WITH HYBRID DRIVE, XXX “ADP – 2021”, Sozopol, 29.06 – 02.07.2021, Magazine “Automation of Discrete Production Engineering”, 3/ July 2021 г., ISSN: 2682-9584, (122-125).
<https://mf.tu-sofia.bg/mntkadp/includes/archive/2021.pdf>
6. Цолов С., РАЗРАБОТВАНЕ НА МЕТОДИКА ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА РОБОТИ С ПАРАЛЕЛНА КИНЕМАТИКА, XXXI МНТК „АДП – 2022”, Созопол, 29.06 – 02.07.2022 г., Списание „Автоматизация на дискретното производство”, бр.4/юли 2022 г., ISSN: 2682-9584, (109-112).
<https://mf.tu-sofia.bg/mntkadp/includes/archive/2022.pdf>
7. Цолов С., Р. Димитрова, С. Николов, СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА АЛГОРИТМИ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА РОБОТИ С ПАРАЛЕЛНА КИНЕМАТИКА, XXXI МНТК „АДП – 2022”, Созопол, 29.06 – 02.07.2022 г., Списание „Автоматизация на дискретното производство”, бр.4/юли 2022 г., ISSN: 2682-9584, (113-119).
<https://mf.tu-sofia.bg/mntkadp/includes/archive/2022.pdf>
8. Димитров С., Г. Рашков, С. Цолов, ПРОГРАМИРАНЕ И УПРАВЛЕНИЕ НА АВТОМАТИЗИРАН СТЕНД ЗА ОТПЕЧАТВАНЕ НА БРАЙЛОВО ПИСМО, XXXI МНТК „АДП – 2022”, Созопол, 29.06 – 02.07.2022 г., Списание „Автоматизация на дискретното производство”, бр.4/юли 2022 г., ISSN: 2682-9584, (179-183).
<https://mf.tu-sofia.bg/mntkadp/includes/archive/2022.pdf>
9. Nikolov S., R. Dimitrova, S. Tsolov, L. Dimitrov, CLASSIFICATION OF PARALLEL KINEMATICS ROBOTS, EEPES 2023, AIP Conf. Proc. 3063, 060001 (2024), <https://doi.org/10.1063/5.0195795>
<https://pubs.aip.org/aip/acp/article/3063/1/060001/3266749/Classification-of-parallel-kinematics-robots>
10. Цолов С., Р. Димитрова, С. Николов, РАЗРАБОТВАНЕ НА ОРИЕНТИРАЩ МОДУЛ ЗА ПАРАЛЕЛЕН ДЕЛТА РОБОТ, XXXII МНТК „АДП – 2023”, Созопол, 29.06 – 02.07.2023 г., Списание „Автоматизация на дискретното производство”, бр.5/юли 2023 г., ISSN: 2682-9584, (27-33).
<https://mf.tu-sofia.bg/mntkadp/includes/archive/2023.pdf>
11. Цолов С., Р. Димитрова, С. Николов, Изследване на точността на позициониране на специализиран робот с паралелна кинематика, XXXIII МНТК „АДП – 2024”, Созопол, 27.06 – 30.06.2024 г., Списание „Автоматизация на дискретното производство”, бр.6/юли 2024 г., ISSN: 2682-9584, (45-48).
<https://mf.tu-sofia.bg/mntkadp/includes/archive/2024.pdf>
12. Tsolov S., R. Dimitrova, S. Nikolov, Problems in designing robots with parallel kinematics, EEPES 2024, MDRI Jornal. (2024), (print).
13. Dimitrova R., S. Nikolov, S. Tsolov, S. Dimitrov, Designing robots with parallel kinematics, Jornal Actuators Q2 (2024), (print).

DESIGN OF SPECIALIZED ROBOTS WITH PARALLEL KINEMATICS

Stanislav Tsolov

Abstract

The aim of the current dissertation is the analysis of robots with parallel kinematics and the development of a unified methodology for their design.

In Chapter 1, robots with parallel kinematics are reviewed and analyzed, with their advantages, disadvantages, difficulties and design issues.

In Chapter 2, a new classification of existing robots with parallel kinematics is developed, the main characteristic of which is the influence of the kinematics and the construction of the robot on the degrees of freedom of the final executive unit.

In chapter 3, a methodology for designing robots with parallel kinematics is developed, including ten stages with the corresponding interrelationships between them.

Chapter 4 examines, analyzes and summarizes the difficulties and problems encountered when designing robots with parallel kinematics, and guidelines for their avoidance are also proposed.

In Chapter 5, the developed methodology is validated by designing a specialized robot with parallel kinematics with an additional orienting module. The construction of a fundamentally new orienting module for a specialized robot with parallel kinematics has been created. A prototype of the designed specialized robot with parallel kinematics was created, and program control, electrical diagram and technical documentation were developed.

In chapter 6, experimental studies of the made prototype of the designed specialized robot with parallel kinematics were carried out. The obtained results are presented in tabular and graphical form and analyzed.