



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

ФАКУЛТЕТ АВТОМАТИКА

Катедра „Автоматизация на електрозадвижванията“

маг. инж. Николай Георгиев Братованов

**МОДЕЛИРАНЕ, СИМУЛАЦИЯ И ОФЛАЙН ПРОГРАМИРАНЕ НА
КЛАС РОБОТИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВАТА ИНДУСТРИЯ**

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: Електротехника, електроника и автоматика

Научна специалност: Роботи и манипулатори

Научен ръководител: доц. д-р Владимир Божилов Заманов

СОФИЯ, 2019 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Автоматизация на електрозадвижванията“ към Факултет Автоматика на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 09.05.2019 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 19.09.2019 г. от 15:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-54/17.05.2019 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. доц. д-р инж. Владимир Заманов – председател
2. проф. д-р инж. Димитър Карастоянов – научен секретар
3. доц. д-р инж. Константин Камберов
4. проф. д-р инж. Тодор Нешков
5. проф. д-р инж. Костадин Костадинов

Рецензенти:

1. доц. д-р инж. Константин Камберов
2. проф. д-р инж. Тодор Нешков

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет Автоматика на ТУ-София, блок №2, кабинет № 2350.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Автоматизация на електрозадвижванията“ на факултет Автоматика. Работи в лаборатория „Роботика“, където е разработен и дисертационния труд. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора и са подкрепени от успешно реализиране в множество практически проекти в автоматизацията на полупроводниковата индустрия.

Автор: маг. инж. Николай Братованов

Заглавие: Моделиране, симулация и офлайн програмиране на клас работи в полупроводниковата индустрия

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Дисертационният труд допринася за изграждането на универсална система за симулация на движенията, анализиране на потребителски задачи и офлайн програмиране, насочена към работи и механизми, използвани в разнообразни области, и най-вече в автоматизацията на полупроводниковото производство. Осигурявайки множество полезни функции, свързани със задълбочени изследвания на автоматизирани системи, предварителни верификационни и оптимизационни дейности, осъществени в интерактивна виртуална среда, внедряването на подобни технологии в съвременната индустрия представлява актуален проблем, имащ съществено влияние върху продуктивността, гъвкавостта и ефективността на съответните предприятия, усъвършенствайки работата на технологичното оборудване и повишавайки качеството на крайните продукти. Въпреки разнообразните решения за симулация и офлайн програмиране на индустриални работи, съществуват множество проблеми и недостатъци, които ограничават приложимостта на наличните системи, особено в специфични области, използващи манипулатори с особени характеристики. Представената дисертация се съсредоточава върху елиминирането на тези недостатъци чрез разработване на универсален подход, базиран на популярния CAD софтуер SolidWorks и неговия приложно-програмен интерфейс. В резултат се осигурява възможност за директно използване на съществуващите 3D модели, позволявайки едновременно решаване на симулационни, проектантски и оптимизационни задачи.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Основната цел на дисертационния труд се състои в разработване и успешно внедряване на ефективна система за моделиране, симулация на движенията и офлайн програмиране на специфичен клас работи, намерили приложение в автоматизацията на полупроводниковата индустрия. За постигане на целта се решават следните основни задачи:

1. Анализиране на съществуващите системи за симулация на движенията и офлайн програмиране, и оценка на тяхната ефективност и приложимост в автоматизацията на полупроводниковата индустрия.
2. Разработване на универсално симулационно приложение, базирано на SolidWorks и неговия приложно-програмен интерфейс, посредством VBA макро програмиране.
3. Моделиране, симулация и анализ на специфичен клас манипулатори с хибридна паралелно-последователна структура, намерили приложение в автоматизацията на полупроводниковата индустрия.
4. Адаптиране на разработеното универсално симулационно VBA приложение към автоматизацията на полупроводниковата индустрия.
5. Изследване на функционалността и ефективността на разработената система, чрез верифициране на нейните три основни приложения – анализиране на потребителски сценарии, офлайн програмиране, и създаване на презентационни материали.

Научна новост

Предложен е подход за разработване на оригинална система за моделиране, симулация на движенията и офлайн програмиране на работи и механизми, обединяваща полезните функции на специализираните 3D симулатори и универсалните CAD пакети, позволявайки директното използване на стандартните модели на работи и оборудване, вече създадени за проектантски и производствени цели.

Разработен е аналитичен подход за моделиране, анализ и симулация на свръхограничен паралелен манипулатор, използван в автоматизацията на полупроводниковата индустрия, неизследван в научната литература.

Практическа приложимост

Практическата приложимост на дисертационния труд е свързана с компания Genmark Automation, Inc., проектираща и произвеждаща решения за автоматизация на разнообразни индустрии, ориентирани към производство на полупроводникови устройства, плоски екрани, соларни панели, LED, твърди дискове и други. Успешното внедряване на разработената система позволява изпълнението на следните практически насочени задачи:

1. *Анализиране на потребителски сценарии* – състои се в прецизно изследване на конкретни задачи и проекти, оценявайки осъществимостта и производителността на автоматизираните системи, анализирайки и оптимизирайки ключови фактори като геометрия на използваните роботи и оборудване, съвместимост със специфични механични ограничения, работни зони, достижимост, потенциални колизии и други.
2. *Офлайн програмиране* – позволява извършването на предварително настройване и точно обучение на автоматизираните системи от разстояние, без да е необходимо наличието на физическото оборудване, спестявайки време, средства и ресурси.
3. *Създаване на презентационни материали* – генериране на висококачествени видеоклипове и графични изображения, даващи подробна информация, свързана с цялостната същност на автоматизираните системи – размери, принцип на работа, брой на компонентите, геометрични ограничения, производителност, технически характеристики. Създадените материали са успешно използвани за презентационни, рекламни и маркетингови дейности.

Апробация

Разработването на дисертацията е извършено в лаборатория „Роботика“ към ФА на ТУ-София, като основна част от изследванията са осъществени във фирма Genmark Automation, Inc., при работа по важни проекти, свързани с компаниите Apple Inc., Infineon Technologies, Samsung, Nanometrix, Tango, VDL и други, както и при подготовка за представяне на фирмени продукти на международни изложения в САЩ, Япония и Европа, насочени към полупроводниковата индустрия (Semicon). Част от резултатите са докладвани и обсъждани на следните конференции:

- Международна научна конференция Автоматика'2015, Факултет Автоматика, Технически университет – София, Созопол, 2015.
- Международна научна конференция Автоматика'2016, Факултет Автоматика, Технически университет – София, Созопол, 2016.
- Международна научна конференция Автоматика'2017, Факултет Автоматика, Технически университет – София, Созопол, 2017.
- Национална научна конференция по машиностроене и машинознание „Дни на механиката“, Варна, 2017.
- The Third IEEE International Conference on Robotic Computing, Naples, Italy, 2019.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани общо в 5 броя научни статии, от които 1 самостоятелна и 4 в съавторство. 4 от статиите са докладвани на

международни конференции (3 в България и 1 в Италия), и 1 – на национална научна конференция. Всички публикации са поместени в сборниците на съответните конференции.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 199 страници, включващ 1 приложение с обем от 6 страници, предговор, съдържание, списък на съкращения, списък на таблици, списък на фигури и списък на използваната литература. Работата е разделена на 6 глави, в които се изпълняват формулираните задачи. Цитирани са общо 117 литературни източници, като 103 са на латиница и 6 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 124 фигури и 4 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Целта на първата въвеждаща глава на дисертационния труд е запознаване на читателя с основните принципи на системите за симулация на работи и офлайн програмиране, и разглеждане на техните основни приложения и приноси в областта на индустриалното производство. Представени са кратки бележки, касаещи компютърните системи за проектиране, производство и изследване (CAD/CAM/CAE), както и връзката им със съвременните решения за симулация на движенията и офлайн програмиране на работи. Извършва се запознаване с характеристиките на автоматизацията на полупроводниковата индустрия и с роботите, работещи в чисти среди, след което се преминава към оценяване на тяхната съвместимост със съществуващите симулационни системи. Въвеждащата Глава 1 завършва с акцентиране върху необходимостта от разработване на интегрирана система за моделиране, симулация и офлайн програмиране на манипулатори, мотивирана от някои ключови проблеми и недостатъци, характерни за наличните софтуерни решения за симулация на работи, подробно изследвани и анализирани в Глава 2 на дисертацията.

ГЛАВА 2. НАЛИЧНИ СИСТЕМИ ЗА СИМУЛАЦИЯ И ОФЛАЙН ПРОГРАМИРАНЕ НА РОБОТИ

Изцяло посветена на проучване и анализ на съществуващите системи за моделиране, симулация на движенията и офлайн програмиране на работи и манипулатори, Глава 2 разглежда двете основни категории от използвани софтуерни решения в индустрията – специализирани 3D симулатори и симулатори, базирани на 3D CAD системи. В отделните подточки на главата се изследват и оценяват по три представителни разработки от всяка категория, считани за най-изчерпателните примери.

2.1. Специализирани 3D симулатори

Специализираните 3D симулатори за работи са компютърни програми, специално разработени и предназначени за изпълнението на разнообразни симулации, свързани с автоматизираните системи. Базирани на виртуални 3D модели на работи и оборудване, тези програми намират приложение в процеса на обучение и настройване на реалните манипулатори, без да е необходимо наличието на физическите системи, спестявайки време и средства. Някои от най-съществените функции на специализираните 3D симулатори са свързани с решаването на кинематични и динамични задачи, извършването на анализ на достижимост, проверка за колизии, планиране на движения, изчисляване на близост до обекти, реалистични сензорни симулации, записване на данни, анимация и визуализация на

системите, анализирани на потребителски сценарии, и други. Основните недостатъци на тези системи са ориентирани към ограничената им приложимост, проблеми с процеса на моделиране и проектиране, несъвместимост на формати, високи цени за лицензиране, необходимост от специални познания и умения за работа с конкретния софтуер.

2.2. Симулатори, базирани на 3D CAD системи

Недостатъците на специализираните 3D симулатори, заедно с фактът, че универсалните CAD пакети са се превърнали в неразделна част от всяка съвременна индустрия, мотивират създаването на втория основен тип софтуер за моделиране, симулация на движенията и офлайн програмиране на работи. Разработените решения, най-често създавани под формата на допълнителни програми (add-ins) към CAD системите осигуряват мощни симулационни възможности. В допълнение, комбинирането на техните вградени функционалности с разширените възможности на специализираните симулаторите в единна платформа решава проблемите, свързани със синхронизираното изпълнение на проектантски и симулационни задачи, съвместимостта на файлови формати и процедурите по конвертиране на модели. Независимо от техния сериозен потенциал, съществуващите CAD-базирани симулационни системи за работи все още не са достатъчно популярни в голяма част от индустриалните приложения, поради наличието на няколко основни недостатъка, ограничаващи тяхната функционалност и ефективност.

В резултат на проведеното литературно проучване се придобива подробна представа за съществуващите решения за симулация на движенията и офлайн програмиране на индустриални работи, на база на която могат да се направят следните основни изводи:

- Голямото разнообразие от полезни функции на специализираните 3D симулатори допринася за повишаване на ефективността на производствените среди посредством подобряване на качеството, увеличаване на производителността, намаляване на времената за програмиране и обучение на използваните работи, и други.
- Въпреки множеството предимства става ясно, че специализираните симулатори се отличават с някои основни недостатъци, които ограничават тяхната приложимост.
- Установява се невъзможност за осигуряване на единна, интегрирана платформа, която би позволила едновременно и синхронизирано изпълняване на симулационни и проектантски задачи, без да се налага използването на няколко различни програми.
- Появява се необходимост от конвертиране на 3D модели, което води до неизбежна загуба на някои основни техни свойства и характеристики, имащи отношение към процесите на проектиране.
- Използването на специализирани симулатори налага създаването на два различни типа 3D модели на работите (един за проектантски и втори за симулационни цели), съответстващи на един и същ продукт, което допълнително усложнява процесите.
- Извършването на дори минимални промени в симулационните модели изисква серия от сложни и продължителни процедури по модификация на проектантските модели, последвана от конвертиране, настройване, верифициране (и обратно).
- Съществуващите CAD-базирани симулационни системи са ориентирани главно към широкоразпространени индустриални приложения като заваряване, боядисване и други, изпълнявани от стандартни универсални манипулатори, което има негативен ефект върху общата им гъвкавост, правейки ги несъвместими с автоматизацията на специфични индустрии, използващи работи и механизми от специален тип.
- Мнозинството от съществуващите CAD-базирани симулатори функционират въз основа на сложни алгоритми за генериране на траектории и планиране на движения,

усложнявайки структурата и ограничавайки гъвкавостта, адаптивността и универсалността на системите.

- Налице са ограничени възможности за извършване на персонализирано моделиране и проектиране, нужда от използване на предефинирани библиотеки, невъзможност за синхронизирано движение на множество роботи, трудности при симулирането на процеси по пренасяне на обекти, и други.

Въз основа на извършения анализ на функционалността, гъвкавостта и приложимостта на съществуващите решения за симулация на движенията и офлайн програмиране на роботи и механизми се достига до заключението, че наличните системи не отговарят в пълна степен на изискванията, наложени от специфичните характеристики на автоматизацията на полупроводниковата индустрия. Това заключение определя основната цел на настоящата дисертация – да се разработи система за моделиране, симулация и офлайн програмиране на манипулатори с общо предназначение, която същевременно да е изцяло съвместима с роботите за пренасяне на силициевы пластини, използвани в процеса на производство на полупроводникови устройства.

ГЛАВА 3. СИСТЕМА ЗА СИМУЛАЦИЯ НА РОБОТИ, БАЗИРАНА НА SOLIDWORKS API

В Глава 3 се разглеждат едни от най-съществените въпроси на дисертацията, свързани с процеса на реализиране на предложената система за симулация на движенията и офлайн програмиране, базирана на SolidWorks API. Изследвайки подробно всяка основна стъпка – дефиниране на общата концепция и архитектура на приложението, осъществяване на SolidWorks API-съвместимо 3D моделиране, извършване на геометрично и кинематично моделиране на манипулатори и оборудване, създаване на връзка към външния управляващ софтуер на симулираните роботи, разработване на допълнителни функции и графичен потребителски интерфейс – представеният материал се стреми към подробно описание на процеса на създаване на симулационната система. Някои от допълнително разгледаните проблеми имат отношение към главните мотиви за създаване на приложението, както и обобщаване на ограниченията и недостатъците на съществуващите решения за симулация и офлайн програмиране на роботи и манипулатори.

3.1. Мотивация

Споменатата липса на адекватни симулационни решения, съвместими с роботите за пренасяне на силициевы пластини, заедно с увеличаващото се значение и приложимост на полупроводниковата индустрия могат да бъдат посочени като главен мотив за създаването на система за симулация на движенията и офлайн програмиране, базирана на популярния CAD продукт SolidWorks и съществуващия към него приложно-програмен интерфейс API. Освен това се акцентира върху различията между автоматизацията на полупроводниковата индустрия и широкоразпространените индустриални приложения (заваряване, нанасяне на покрития), както и върху основните ограничения и недостатъци на съществуващите решения за симулация и офлайн програмиране на роботи и манипулатори.

3.2. Концепция и архитектура на системата

Предложеният подход за осъществяване на симулационната система, представена в настоящата дисертация е базиран на приложно-програмен интерфейс (API) на SolidWorks, даващ пълна свобода и гъвкавост при процеса на разработване на персонални приложения и инструменти. Именно подобно VBA-базирано SolidWorks макро приложение стои в основата на създадената система за симулация на движенията и офлайн програмиране.

3.2.1. SolidWorks API

Приложно-програмният интерфейс API на SolidWorks представлява мощна платформа, съдържаща стотици SolidWorks интерфейси, съставени от разнообразни методи и свойства, който могат да бъдат адресирани чрез VBA, VB.NET, C# или C++ програми. Базиран на обектния модел на SolidWorks, API осигурява директен достъп до пълната функционалност на CAD пакета, позволявайки разработването на персонални приложения за извършването на специфични задачи и процедури, какъвто е случаят при изпълняването на симулация на движенията и офлайн програмиране на разнообразни роботи и манипулатори, използвайки техните съществуващи 3D модели, създадени за производствени цели.

3.2.2. VBA приложение (SolidWorks макро)

Основната задача на VBA-базираното макро приложение се състои в задвижване на съществуващите 3D сглобени единици на роботите, създадени за целите на проектиране и производство, което се осъществява чрез изграждане на връзка между SolidWorks и управляващия софтуер на симулираните манипулатори и механизми. Тази основна макро функционалност изисква трансферирането на данни между отделните две платформи, което се осъществява в следната последователност – първо, информацията за движенията се извлича от генерирания от системата за управление текстов файл, съдържащ текущите стойности на всички стави/логически оси на управлявания манипулатор. Следва подходящо обработване на събраните данни и изпращането им към вече дефинираните уравнения на движение (кинематичен модел) на механизма. Премахва се към имплементирането на процедури, свързани със селектиране на компоненти, решаване на уравнения на движение, и трансформация на матрици, допринасящи за задвижването на сглобените единици. Допълнителни функции на макро приложението имат отношение към симулация на процеса по пренасяне на обекти, извличане на текущите координати на механизмите, изпълнение на ‘Ръчно преместване’, и създаване на интуитивен графичен потребителски интерфейс, съвместим с разработеното VBA приложение, чиято структура е показана на Фигура 3.12.



Фигура 3.12. Структура на VBA-базираното SolidWorks макро приложение.

3.3. SolidWorks API-съвместимо 3D моделиране

Преди създаването на VBA-базирано макро приложение, необходимо за изпълнението на симулация на движенията и офлайн програмиране на роботи и механизми е необходимо извършването на важна предварителна стъпка, свързана с анализиране и модификация на съществуващите модели. Нейната цел се състои в изграждането на нови сглобени единици,

съвместими и адаптирани към общата функционалност на предложения подход, базиран на специфични SolidWorks API методи и интерфейси. Описаната процедура по модифициране на моделите се състои от следните два основни етапа – декомпозиция на съществуващите сглобени единици и предефиниране на координатните системи на всеки отделен компонент на симулираните роботи и механизми.

3.4. Геометрично и кинематично моделиране

Създаването на сглобени единици с подходящо разположени координатни системи, съвместими със SolidWorks API, позволява директното използване на тези модели за извършването на прецизни симулации на движенията и офлайн програмиране. Процесът по задвижване на сглобените единици изисква реализирането на важна процедура във VBA-базираното макро приложение, свързана с осъществяването на геометрично и кинематично моделиране на симулираните механизми. Целта е създаване на формално описание на техните структури, дефиниране на уравнения на движение, извършване на трансформации на матрици, и задвижване на отделните компоненти с помощта на специфични SolidWorks API методи и интерфейси. Най-разпространените случаи на роботи с отворена кинематична структура се моделират с помощта на конвенцията на Денавит и Хартенберг, която се базира на четири величини (a, α, d, θ), три от които са константни, описващи геометрията на звената, и една променлива, наречена още обобщена координата, която може да бъде ротационна (θ) или транслационна (d), в зависимост от типа на ставата, между съответните звена. Описването на положението на всяко едно от звената спрямо неговите съседни изисква еднозначно разполагане на координатни системи, съблюдавайки набор от правила, дефинирани от конвенцията. Използвайки описания подход се определят всички параметри, описващи конкретния сериен манипулатор. Базирайки се на изведените данни се дефинират връзките между координатните системи на отделните звена. В резултат, положението на всяко звено се изразява спрямо другите като функция на четирите параметъра на Денавит и Хартенберг. По такъв начин трансформационната матрица на всяко едно звено ${}^{i-1}_iT, i = 1, 2, 3, \dots, n-1, n$, където n = броя на звена, може да бъде изчислена. Следващата стъпка се състои в умножаване на трансформационните матрици на всички звена, довеждащо до намирането на единична трансформация, която прави връзка между координатната система на последното, изпълнително звено n на робота и координатната система на нулевото звено 0 , представляващо основата на самата структура. Получената трансформация 0_nT , функция на всички ставни променливи на съответния робот, служи за еднозначното извеждане на уравненията на движение.

3.5. Връзка с управляващия софтуер на механизмите

Подходът за задвижване на сглобените единици, използван при текущото приложение, е базиран на специален метод, с помощта на който ставните променливи на симулираните манипулатори получават своите конкретни стойности от източник, външен за SolidWorks-базираната симулационна система. Следователно, процедурите по планиране на движения и траектории не са интегрирани към разработената система. Вместо това, в реално време се осъществява връзка с управляващия софтуер на симулираните механизми, която извлича и подава информация към VBA процедурата за геометрично и кинематично моделиране. Подобна оригинална концепция се възползва от вече създадените високоефективни алгоритми за планиране и управление на движения, разработени специално за конкретните механизми, като същевременно допринася за простотата, гъвкавостта и надеждността на разработената симулационна система, базирана на SolidWorks API.

Реализирането на въпросната процедура се състои в четене на външен текстов файл, съдържащ текущите стойности на всички стави/логически оси на манипулаторите. Следва подходящо обработване на събраната информация, която впоследствие се изпраща към вече дефинираните уравнения на движение. Първият етап от описания подход се състои в

анализиране и идентифициране на текстовия файл, генериран от управляващия софтуер на съответния механизъм. Целта е осигуряване на информация, касаеща броя на наличните ставни променливи/логически оси, както и тяхната специфична подредба. Процедурата завършва със създаване на цикъл, който осъществява изпълнението на описаните операции по непрекъснат начин, гарантирайки плавното задвижване на сглобените единици.

3.6. Допълнителни функции и графичен потребителски интерфейс

Изграждането на три допълнителни процедури към основното VBA приложение, имащи отношение към функцията 'Ръчно преместване', възможността за манипулиране на обекти, и създаването на графичен интерфейс, допринасят за разширяване на функционалността на приложението и за осигуряването на ефективни възможности за офлайн програмиране, симулиране на процеса по пренасяне на обекти, и ефикасно взаимодействие с потребителя.

3.6.1. Функция "Ръчно преместване" (Motion-by-Drag)

Описаната дотук функционалност на SolidWorks API-базираната система за симулация на движенията (режим 'Simulator') налага премахването на всички съществуващи връзки между отделните звена на използваните 3D модели. В случай на извършване на офлайн програмиране, обаче, тези модели и съответните VBA процедури се оказват неефективни. Ето защо е необходимо създаването на втори основен режим, наречен 'Drag'. Неговата цел е осигуряване на възможност за ръчно преместване на моделите на роботите, както и извличане на стойностите на всички ставни променливи/логически оси, съответстващи на текущото положение на симулирания механизъм. Впоследствие, получената информация може да бъде въведена в управляващия софтуер, допринасяйки за осъществяването на ефективен подход за офлайн програмиране. Успешната имплементация на гореспоменатата концепция се определя основно от подходящото адаптиране на съответните 3D модели (същите, които се използват за стандартни симулационни задачи), включващо дефиниране на всички връзки и кинематични зависимости между отделните звена на механизмите. Втората главна стъпка има отношение към добавянето на специфични SolidWorks елементи, наречени сензори за размери и сензори за близост. Тези виртуални инструменти осигуряват полезна информация, свързана с големината на преместванията на ставите или логическите оси на манипулаторите, както и за техният обхват и посока на движение. Следва създаване на VBA процедури, съдържащи референции, селекции, условия и изчисления, ориентирани към извлечените сензорни данни, в резултат на което се реализира функцията, наречена 'Извличане на координати'.

3.6.2. Манипулиране на обекти

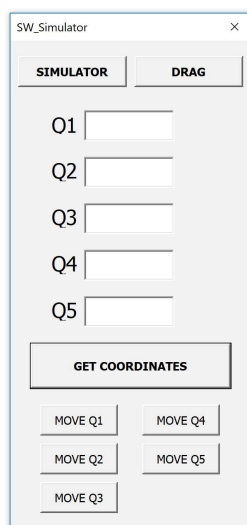
Друга важна допълнителна функционалност е свързана с извършването на реалистични симулации на манипулационни операции, които са изключително популярни при голяма част от индустриалните работи, в това число и при роботите за пренасяне на силициев пластили, приложими в автоматизацията на полупроводниковата индустрия. Процесът на изграждане изисква отчитането на следния сценарий: при вземането на обект отстрана на съответния робот, координатните системи на обекта (O_t) и на изпълнителното звено (O_e) започват да се движат по идентичен начин, еквивалентен на обединяване на двете отделни тела в единичен компонент. Веднага щом обектът бъде пуснат, условието ${}^0T \equiv {}^tT$ става невалидно, довеждайки до стационарното състояние на обекта, чиято координатна система остава произволно позиционирана и ориентирана спрямо основата, съответстваща на 0T при точния момент на пускане. От този момент нататък, изпълнителното звено започва да се движат независимо от манипулирания обект, до момента на изпълнение на следващата команда за вземане, при която условието ${}^0T \equiv {}^tT$ отново влиза в сила.

Очевиден е фактът, че имплементирането на описания подход изисква наличието на 3D модели на манипулираните обекти с подходящо прикачени координатни системи, без да съществува ограничение на техния брой. Въпросните модели трябва да бъдат произволно

разположени в основната сглобена единица на робота, без да се извършва дефинирането на връзки между тях и други компоненти. Друго ключово изискване има отношение към логиката на манипулационния процес – тоест, по какъв начин VBA приложението (и респективно SolidWorks) разбира точния момент на вземане или пускане на специфичния обект. Решаването на този въпрос се случва с помощта на управляващия софтуер на симулираните механизми, въвеждайки специфични променливи в генерирания от него текстов файл. Тяхната цел се състои в отразяване на точния момент на вземане или поставяне на конкретен обект, както и в идентифициране на използваното изпълнително звено (в случай че съществуват повече от едно).

3.6.3. Графичен потребителски интерфейс

Осъществяването и поддържането на цялостната функционалност на създадената система за моделиране, симулация и офлайн програмиране налагат разработването на интуитивен графичен потребителски интерфейс, изпълняващ ролята на връзка между потребителя, VBA-базираната програма, и съответните SolidWorks обекти, инструменти и компоненти. Описаната разработка позволява на потребителя да се възползва от всички процедури, реализирани в основната програма, осигурявайки базови средства за управление (бутони, текстови полета, етикети). Някои от най-важните характеристики на графичния потребителски интерфейс са свързани с превключване между основните режими ‘Simulator’ и ‘Drag’, с извличане на ставни координати, специфични за текущата конфигурация на робота, и с избиране на конкретни ставни променливи/логически оси, по които да се изпълнява ръчно преместване на сглобената единица на робота (Фигура 3.26).



Фигура 3.26. Графичен потребителски интерфейс на SolidWorks API-базираната система.

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРАНЕ И СИМУЛАЦИЯ НА РОБОТИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВАТА ИНДУСТРИЯ

Възможността за симулация на движенията и офлайн програмиране на манипулаторите, намерили приложение в полупроводниковата индустрия, с помощта на SolidWorks API-базираната система, има критично значение за успешното постигане на крайната цел на настоящата дисертация. В тази връзка се налага извършването на моделиране и формално описание на хибридната структура на роботите за пренасяне на силициевы пластини, съставена от равнинна серийна ръка тип SCARA, и свръхограничена паралелна GPR платформа – процедура, подробно разгледана в Глава 4. В резултат, предложената симулационна система е успешно интегрирана и адаптирана към същността на специалните

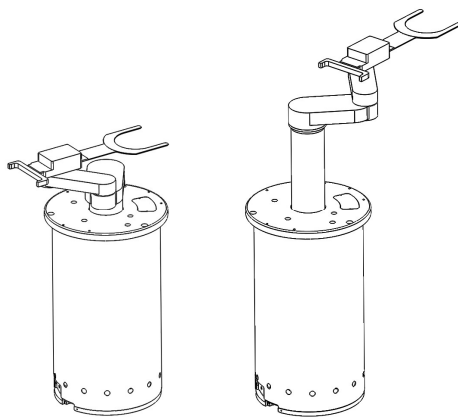
роботи за полупроводниковата индустрия, което на свой ред позволява изпълняването на разнообразни задачи, свързани с прецизно анализиране на потребителски сценарии, офлайн програмиране и създаване на висококачествени презентационни материали.

4.1. Роботи за пренасяне на силициевы пластини

Роботите за пренасяне на силициевы пластини, интензивно използвани в процеса на производство на полупроводникови устройства, представляват съществен елемент от автоматизацията на полупроводниковата индустрия. Производствените процеси изискват точно, бързо и плавно пренасяне на пластини между отделните станции като същевременно се отчитат и стриктните изисквания за висока чистота на средата, ограничените работни зони и множеството механични ограничения на системите. Отчитайки интензивността на процесите, динамиката на пазара и специфичните особености на полупроводниковата индустрия, е основателно роботите за манипулиране на силициевы пластини да бъдат разглеждани като ключови компоненти, чиито характеристики като производителност, точност и надеждност имат съществено влияние върху цялостния производствен процес. Следователно възможността за изучаване, симулиране, анализиране и оптимизиране на тяхното движение и поведение с помощта на симулационни инструменти, неимуеуемо би довела до повишаване на производителността, усъвършенстване на крайните продукти и оптимизиране на общата ефективност на производствените системи. Изпълнението на описаните функции е свързано със създаването на подробни модели на манипулаторите за пренасяне на силициевы пластини, което изисква запознаването с тяхната геометрия, кинематична структура, характеристики и спецификации.

4.1.1. Структура, свойства и спецификации

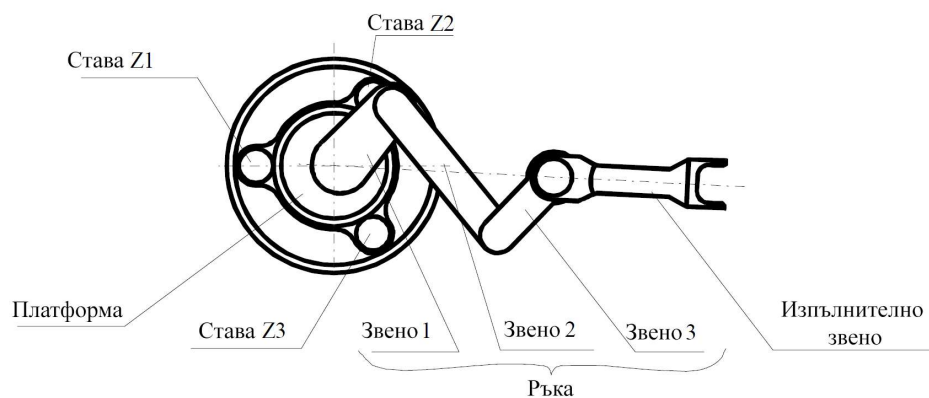
Силициевите пластини, използвани в полупроводниковото производство най-често се манипулират в хоризонтални равнини при разнообразни вертикални позиции, извършвайки движения в обхвата на човешката ръка, изразени в цилиндрични координати. Описаната схема се доближава до кинематичната структура на SCARA роботите, превръщайки тяхната концепция в очевиден избор при проектирането на роботи за пренасяне на силициевы пластини [55]. Единствената разлика има отношение към вертикалното движение, което при стандартната SCARA структура е разположено в края на двузвенната ръка. Подобна подредба е невъзможна при роботите за пренасяне на силициевы пластини, тъй като всички манипулирани обекти в областта изискват тънко и хоризонтално ориентирано изпълнително звено, позволяващо достигането до тънки процепи. Поради тази причина е необходимо вертикалната ос на използваните роботи да бъде преместена от края на ръката към основата на робота, създавайки модифицирана SCARA структура, намерила най-широко приложение в автоматизацията на полупроводниковата индустрия (Фигура 4.1).



Фигура 4.1. Модифицирана SCARA структура, популярна в полупроводниковата индустрия.

4.1.2. Кинематично моделиране на равнина ръка тип SCARA

Модифицираната SCARA концепция, заедно с някои допълнителни особености и функционалности, определят общата структура на ръката за манипулиране на силициевы пластини, която представлява серийна отворена кинематична верига, съставена от няколко звена (най-често две или три), свързани помежду си посредством ротационни стави от пети род (с една степен на подвижност). При ръка с три звена, първото звено е винаги успоредно на третото, което представлява специфична особеност на механичния дизайн (Фигура 4.7). Ръката, функционираща в цилиндрична координатна система и задвижвана от два двигателя, може да се изпъва и свива в равнината на нейното движение. Освен това, тя може да се върти около централната си ос, по такъв начин достигайки всички точки от текущото равнинно сечение на работната зона.



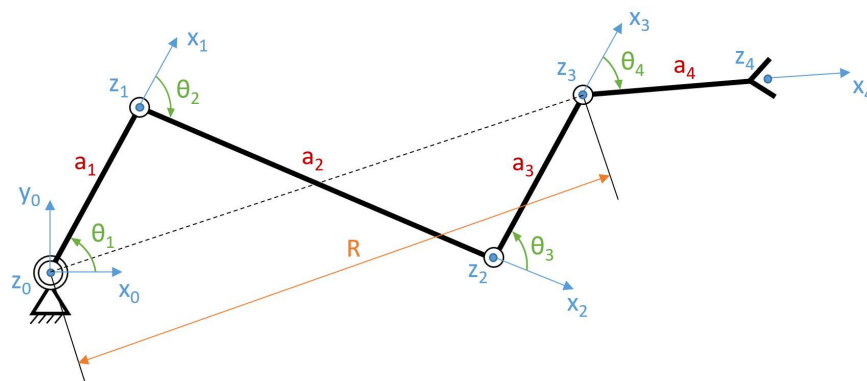
Фигура 4.7. Структура на тризвенна ръка за манипулиране на силициевы пластини.

Липсата на директен достъп до двигателите на ръката е друга характерна черта на роботите за манипулиране на силициевы пластини. Вместо това, потребителят управлява логически оси, съответстващи на движението на един или няколко двигателя. Логическите оси, налични при най-популярната конфигурация на манипулатор с три звена, са описани в Таблица 2.

Таблица 2. Логически оси на робот за пренасяне на силициевы пластини.

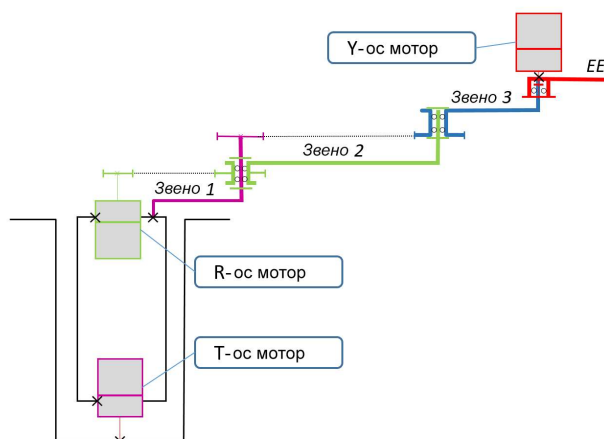
Ос	Име	Тип	Описание
T	Theta	Ротационна	Ротация на ръката около централната ос
R	R	Линейна	Изпъване и свиване на ръката в нейната равнина
Y	Yaw	Ротационна	Ротация на изпълнителното звено около неговата ос. Измерва се спрямо третото звено на ръката.

Запознаването със структурата на манипулационната ръка и изграждането на формално описание на нейната мобилност са ключови стъпки от процеса на адаптиране на вече създадената VBA процедура за геометрично и кинематично моделиране към роботите за пренасяне на силициевы пластини. В тази връзка е необходимо създаване на прецизен кинематичен модел на тризвенната ръка, прикачване на координатни системи към всяко едно от звената, базирайки се на правилата на Денавит и Хартенберг, и дефиниране на съответните параметри, впоследствие използвани за формалното описание на геометрията на роботизираната ръка, както и за установяване на връзките между отделните координатни системи (Фигура 4.10).



Фигура 4.10. Кинематичен модел на тризвенната ръка за пренасяне на силициевы пластини.

Характерната структура и куплираната механика на ръцете на роботите за пренасяне на силициевы пластини са базирани на няколко двигателя (два или три), които са свързани към звената на ръцете директно или посредством зъбно-ремъчни предавки (Фигура 4.11) [58].



Фигура 4.11. Разположение на двигатели и механични зависимости при тризвенната ръка.

Изпълняването на равнинна ротация на ръката (ос Т), праволинейно движение (ос R), и ротация на изпълнителното звено (ос Y) налага отчитането на някои механични особености и характерни зависимости при осъществяване на процедурата по кинематично моделиране:

- Ос Т:
 - Ротационното движение на ръката се извършва чрез завъртане на цялото задвижване на ъгъл q_T , посредством двигател Т-ос.
 - Изисква се синхронизирано движение на двата основни двигателя Т-ос и R-ос.
- Ос R:
 - Извършва се чрез синхронизирано движение на двигателите Т-ос и R-ос.
 - В резултат на съществуващите взаимовръзки, специфични предавателни отношения и закони за управление, се осъществява праволинейно движение на върха на ръката (далечният край на третото звено) като функция на единствено завъртане на ъгъл q_R при основата [59].

Отчитайки горепосочените ограничения, могат да се формулират следните връзки при изпълнението на праволинейно движение на ръката:

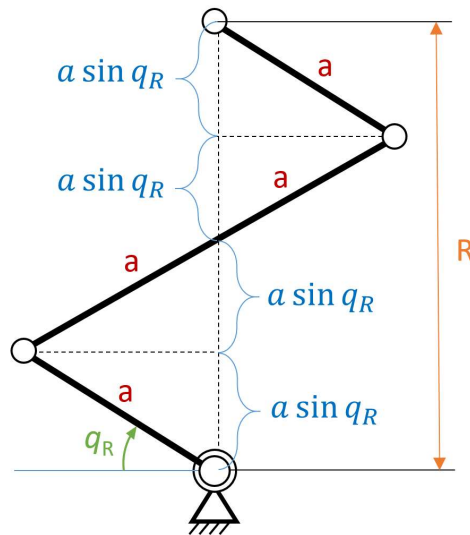
- Първото звено се завърта на ъгъл q_R (вследствие на задвижването на двигател Т-ос);
- Второто звено се завърта на ъгъл $\theta_2 = -2q_R$ (вследствие на задвижването на двигател R-ос).
- Третото звено се завърта на ъгъл $\theta_3 = 2q_R$ (в резултат на куплирането чрез зъбно-ремъчни предавки със съответни предавателни отношения).
- В сила са следните закономерности, свързани с геометрията на звена 1, 2 и 3 (със съответни дължини a_1, a_2 и a_3):

$$\begin{aligned} a_2 &= 2a_1 \\ a_3 &= a_1 \end{aligned} \quad (3)$$

Следователно може да се заключи, че големината на праволинейното отместване на ръката (R) е функция от ъгъла на завъртане при основата (q_R) и дължината на ръката ($L = a_1 + a_2 + a_3$). Връзката между описаните величини, графично представена на Фигура 4.12, може да бъде изразена чрез следните уравнения:

$$R = L \sin q_R \quad (4)$$

$$q_R = \sin^{-1} \frac{R}{L} \quad (5)$$



Фигура 4.12. Графично представяне на праволинейно движение на тризвенната ръка (ос R).

- Ос Y:
- Ротационното движение на изпълнителното звено се осъществява чрез завъртане на самото звено на ъгъл q_Y , посредством двигател Y-ос, който е директно свързан към него.

На база на създадения модел се изгражда таблица на Денавит и Хартенберг, отразяваща всички съществуващи кинематични връзки на ръката (Таблица 4). Тук е важно да се отбележи, че в случаите на симулация на ръце с две звена, със или без ос Yaw, 'обръщащи се' изпълнителни звена, двойни ръце, и други модификации, се вземат под внимание аналогични кинематични зависимости и подходи за моделиране.

Таблица 4. Д-Х параметри на тризвенната ръка, показана на фигура 4.10.

Звено i	Д-Х параметри			
	a_i [мм]	α_i [°]	d_i [мм]	θ_i [°]
1	$a_1 = l$	0	0	$\theta_1 = q_T + q_R$
2	$a_2 = 2l$	0	0	$\theta_2 = -2q_R$
3	$a_3 = l$	0	0	$\theta_3 = 2q_R$
4	$a_4 = l_{ee}$	0	0	$\theta_4 = q_Y$

4.2. Свърхограничени паралелни механизми

Паралелните механизми и манипулатори привличат съществен научен интерес през последните тридесет години [60, 61, 62, 63]. Прогресивно нарастващото внимание е вдъхновено от техните основни предимства пред серийните манипулатори, чиято отворена структура е достигнала границите на основните си динамични възможности [64]. За разлика от последователните роботи, паралелните механизми предлагат подобрена точност, по-ниски инерционни характеристики, завишени скорости и ускорения и повишена структурна твърдост/стабилност, превръщайки ги в обект на интерес от страна както на индустрията, така и на академичните сфери [65, 66]. Независимо от факта, че стандартните паралелни механизми (платформа на Стюарт, Delta роботи, хексаподи, кабелно-задвижвани роботи, сферични роботи с три степени на свобода, и други) са намерили широко индустриално приложение, използването на специфичния клас свърхограничени паралелни механизми в автоматизацията на производството е все още доста ограничена.

4.2.1. Приложения, свойства и примери

Някои от предимствата на свърхограничените паралелни механизми в сравнение със стандартните са свързани с тяхната повишена стабилност, подобрена точност, по-висока товароносимост, опростена структура, повишена надеждност и по-ниска себестойност [74]. Независимо от огромното разнообразие от високотехнологични механични компоненти, материали, лагери, трансмисии, мотори, сензори, контролери и изчислителни устройства, приложимостта на свърхограничените паралелни манипулатори в индустрията е все още доста ниска. Една от основните причини за това е свързана със сложната същност на тези механизми (по отношение на геометрия, кинематика, динамика и управление), правейки ги изключително трудни за моделиране, анализиране, оптимизиране и имплементиране [86]. Сложни анализи на мобилност, точност и податливост, оценка на сингулярности, входно-изходни зависимости, и други важни изследователски процедури изискват влагането на огромни усилия и средства за тяхното изпълнение и пълно разбиране.

Въпреки това, съществуват различни подходи за моделиране, изследване и анализиране на свърхограничени паралелни манипулатори, което е довело до синтезирането на известен брой примери и разработки. След извършването на обстоен анализ, обаче, се установява, че по-голямата част от тях са създадени основно за научноизследователски, експериментални и академични цели. Независимо от техния безспорен принос към областта на паралелните механизми, мнозинството от предложените устройства се характеризират с изключително ограничена или с изцяло липсваща индустриална приложимост. Противоположно на тази тенденция, една от основните задачи на настоящата дисертация е свързана с моделирането, анализирането и симулацията на специален тип свърхограничен паралелен манипулатор, намерил изключително широко приложение в автоматизацията на полупроводниковата индустрия вече повече от двадесет години.

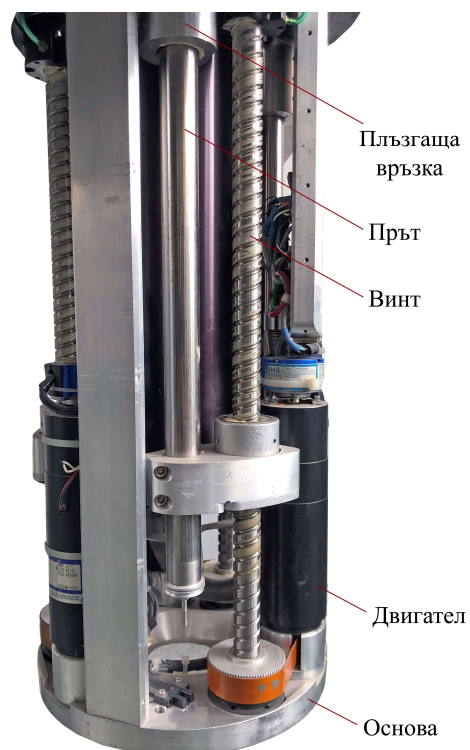
4.2.2. Кинематично моделиране, анализ и симулация на GPR

При повечето задачи, свързани с пренасяне на силициеви пластини, освен движението в хоризонтална равнина, се налага и извършването на премествания във вертикално направление (ос Z), както и наклоняване на ръката по време на изпълняването на прецизни

движения. Поради тази причина, вдъхновени от множеството предимства на паралелните механизми, в Genmark Automation, Inc. планират разработването и производството на специфичен тип свръхограничен паралелен манипулатор, впоследствие намерил широко приложение в автоматизацията на полупроводниковата индустрия. Механизмът е наречен GPR™ (от ‘Gimbal Positioning Robot’), регистриран и патентован през 1996 [9]. Притежаващ три степени на свобода, GPR е проектиран за извършването на две малки независими ротации (в интервала ± 1.5 градуса) и една основна трансляция с голям обхват (до 20 инча). Изпълнителното звено (платформата) се използва за основа, върху която се инсталира серийната TRY равнинна ръка (една или две) с до четири степени на свобода. Полученият хибриден паралелно-последователен механизъм е способен да се адаптира към различни неточности в технологичното оборудване и да компенсира деформации на ръката или на пренасяния обект.

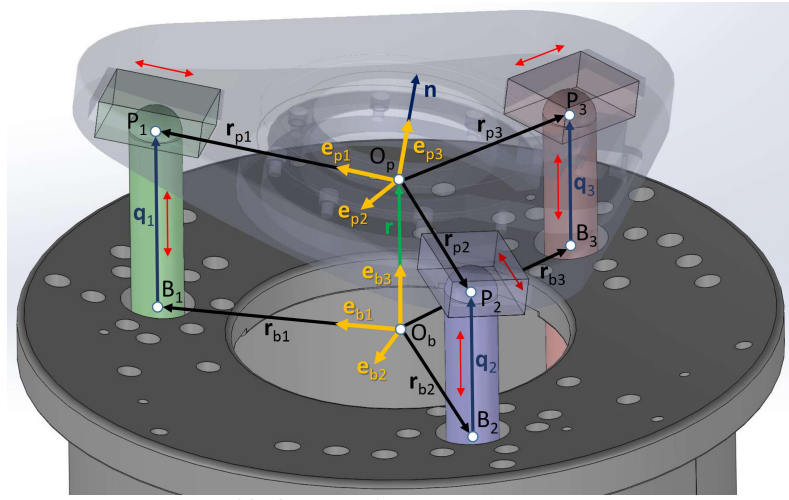
4.2.2.1. Структура

GPR механизмът се състои от основа и платформа, свързани помежду си чрез три пръта и кинематични връзки. Трите пръта са паралелни един на друг и са свързани с основата посредством активни плъзгащи връзки от пети род, чиито оси са също успоредни (Фигура 4.18). Връзките между прътите и платформата са пасивни и от сферичен тип.

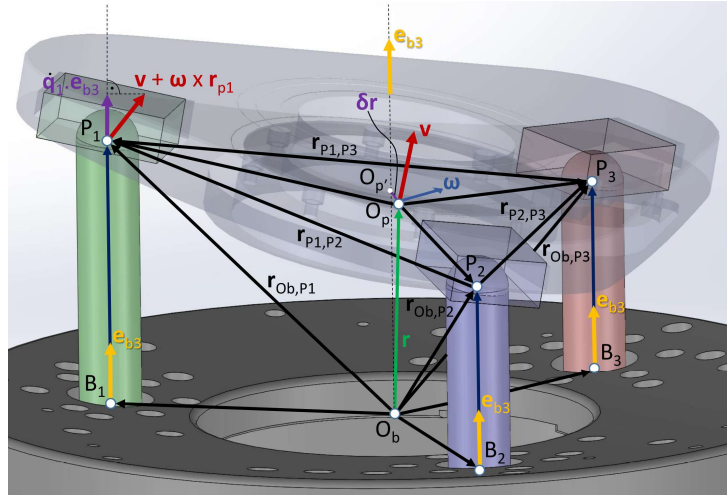


Фигура 4.18. Структура на GPR механизма – основа.

Съществуват две ортонормални координатни системи – $O_b \mathbf{e}_{b1} \mathbf{e}_{b2} \mathbf{e}_{b3}$ и $O_p \mathbf{e}_{p1} \mathbf{e}_{p2} \mathbf{e}_{p3}$, твърдо свързани към основата и респективно към платформата на GPR. Центровете на сферичните стави са означени с P_k , а пресечните точки на плъзгащите връзки с равнината на основата, минаваща през нейния център O_b – с B_k , $k = 1, 2, 3$. Също така се дефинират множество радиус-вектори: $\mathbf{r}_{O_b P_k} = (x_{O_b P_k} \ y_{O_b P_k} \ z_{O_b P_k})^T$; $\mathbf{r}_{b k} = \overrightarrow{O_b B_k}$; $\mathbf{r}_{p k} = \overrightarrow{O_p P_k}$; $\mathbf{r}_{P_k P_l} = \overrightarrow{P_k P_l}$, изобразени на Фигура 4.20 и Фигура 4.21. Дължината на $\overrightarrow{B_k P_k}$ е означена с q_k като $\mathbf{q} = (q_1 \ q_2 \ q_3)^T$ представлява векторът на обобщените координати.



Фигура 4.20. Основни бази и радиус-вектори.



Фигура 4.21. Допълнителни радиус-вектори и разпространение на скорости.

4.2.2.2. Анализ на мобилността

Позицията и ориентацията на всички звена на GPR се дефинират еднозначно с помощта на съвкупност от параметри $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^N$, не всички от които са независими. Подходящ избор за $\mathbf{P}$ е $(\mathbf{q}^T \mathbf{r}_{ObP_1}^T \mathbf{r}_{ObP_2}^T \mathbf{r}_{ObP_3}^T)^T$. Уравненията на връзките, наложени на $\mathbf{P}$ от механизма са:

$$\Phi: \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}^N: \Phi(\mathbf{P}) = 0 \quad (6)$$

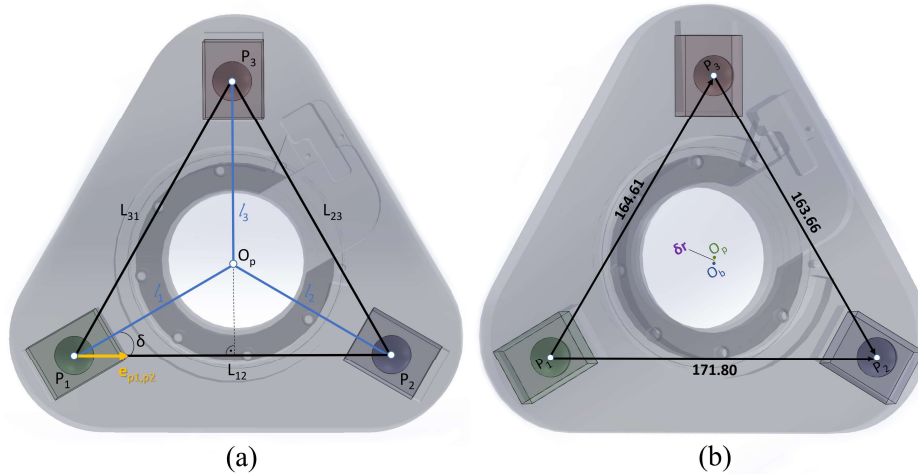
Отчитайки дефиницията на $\mathbf{P}$, (6) може да бъде изразено по следния начин:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{b1} + q_1 \mathbf{e}_{b3} - \mathbf{r}_{ObP_1} &= 0 \\ \mathbf{r}_{b2} + q_2 \mathbf{e}_{b3} - \mathbf{r}_{ObP_2} &= 0 \\ \mathbf{r}_{b3} + q_3 \mathbf{e}_{b3} - \mathbf{r}_{ObP_3} &= 0 \\ (\mathbf{r}_{ObP_2} - \mathbf{r}_{ObP_1})^2 - L_{12}^2 &= 0 \\ (\mathbf{r}_{ObP_3} - \mathbf{r}_{ObP_2})^2 - L_{23}^2 &= 0 \\ (\mathbf{r}_{ObP_1} - \mathbf{r}_{ObP_3})^2 - L_{31}^2 &= 0 \end{aligned}$$

Матрицата на Якоби на $\Phi(\mathbf{P})$ е:

$$\frac{d\Phi}{d\mathbf{P}} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{11} & -\mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0}_3 & -\mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{A}_{31} & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & -\mathbf{I}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{A}_{42} & \mathbf{A}_{43} & \mathbf{A}_{44} \end{pmatrix}$$

Мобилността на GPR механизма, характеризирана чрез неговите степени на свобода, се изразява чрез $h = N - \text{rank}\left(\frac{d\Phi}{d\mathbf{P}}\right)$ [111]. В случай че $q_1 = q_2 = q_3$, $\text{rank}\left(\frac{d\Phi}{d\mathbf{P}}\right) = 9$ и $h = 3$. С други думи, в този случай платформата има моментна локална мобилност с размерност, равна на три. Наличието на дори минимални промени на координатите q_1 , q_2 , q_3 , които са от порядъка на нормалните отклонения от успоредност на прътите свързващи платформата с основата, води до $\text{rank}\left(\frac{d\Phi}{d\mathbf{P}}\right) = 11$. Това означава, че в тази вече модифицирана конфигурация платформата има само една степен на свобода, което представлява очевиден недостиг. Поради факта, че $\text{rank}\left(\frac{d\Phi}{d\mathbf{P}}\right)$ е винаги равен на 11, освен при $q_1 = q_2 = q_3$, ограниченията, наложени от платформата, посредством нейните сферични стави, трябва да бъдат освободени. В действителност, това се случва по естествен път, благодарение на несъвършенствата в ставите и еластичностите на звената, които реализират компенсирането на недостига от две степени на свобода. Моделирането на описаното поведение налага въвеждането на три виртуални плъзгащи връзки към платформата, показани на Фигура 4.. Техните оси съвпадат със съответните радиус-вектори $\overrightarrow{O_p P_k}$. По този начин, геометрията на GPR механизма може да се представи с помощта на следните параметри: $\mathbf{X} = (l_1 \ l_2 \ l_3)^T$ и $\mathbf{Y} = (L_{12} \ L_{23} \ L_{31})^T$. В случай, че механизмът е в сингулярна конфигурация, $l_1 = l_2 = l_3$ и $L_{12} = L_{23} = L_{31}$ (Фигура 4.22a). Фигура 4.22b изобразява конфигурация, съответстваща на наклоняване на платформата, при която $l_1 \neq l_2 \neq l_3$ и $L_{12} \neq L_{23} \neq L_{31}$.



Фигура 4.22. GPR платформа: (a) – паралелна на основата; (b) – наклонена.

Задълбоченото изследване на мобилността на GPR, разширен чрез описаните виртуални връзки, изисква въвеждането на нова съвкупност от параметри $\Psi = (\mathbf{P}^T \ \mathbf{Y}^T)^T$, $\Psi \in \mathbb{R}^{N+3}$, и предефинирането на уравненията на ограниченията:

$$\Phi(\Psi) = 0 \quad (7)$$

Тук е важно да се отбележи, че за разлика от $\text{rank}\left(\frac{d\Phi}{d\mathbf{P}}\right)$, $\text{rank}\left(\frac{d\Phi}{d\Psi}\right)$ е винаги равен на 12 т.е., той не зависи от ‘близостта’ до сингулярност. Следователно, разширеният модел на GPR

механизма винаги има три степени на свобода, равни на $\dim(\Psi) - \text{rank}\left(\frac{d\Phi}{d\Psi}\right)$. Преминува се към диференциране на (7) по отношение на $\mathbf{P}$ и $\mathbf{Y}$, и изследване на характеристиките на матриците $\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{P}}$ и $\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{Y}}$. Матрицата $\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{Y}}$, която е винаги от пълен ранг, равен на три, може да бъде изразена по следния начин:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{Y}} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & -2L_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2L_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2L_{31} & 0 \end{pmatrix}$$

След пренаписването на (7) във вида:

$$\Phi(\mathbf{P}, \mathbf{Y}) = 0$$

и последващото му диференциране се получава:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{P}} d\mathbf{P} + \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{Y}} d\mathbf{Y} = 0 \quad (8)$$

Отчита се и декомпозицията по сингулярни стойности на $\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{P}} = \mathbf{U}_p \mathbf{S}_p \mathbf{V}_p^T$ и $\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{Y}} = \mathbf{U}_y \mathbf{S}_y \mathbf{V}_y^T$ [112]. Установява се, че собствените стойности и сингулярните числа на $\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{P}}$, $\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{Y}}$ и $\frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \mathbf{P}}$ могат да бъдат ефективно използвани в процеса на изследване и анализиране на чувствителността на вектор $\mathbf{P}$ към промени във вектор $\mathbf{Y}$ и обратно.

4.2.2.3. Анализ на точността

В текущия раздел се анализира точността на разширения модел на GPR механизма (базиран на добавените виртуални трансляционни връзки). Извършването на този анализ изисква решаването на правата и обратната задачи на кинематиката на ниво позиция. Както става ясно от Фигура 4.b, в резултат на наклоняването на GPR платформата, нейният центърът се измества на разстояние $d\mathbf{r}$, което реално може да се счита като неточност, в случай че не се изчисли и компенсира по правилен начин. Решаването на правата и обратната задача на кинематиката изисква изучаване на уравнения на ограничение, наложени върху $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Y}$, както и техните производни. Следващите изрази характеризират връзката между $\mathbf{X}$, $\mathbf{Y}$, $\dot{\mathbf{X}}$ и $\dot{\mathbf{Y}}$:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0 \quad (11)$$

което е еквивалентно на:

$$\begin{aligned} l_1^2 + l_2^2 + l_1 l_2 - L_{12}^2 &= 0 \\ l_2^2 + l_3^2 + l_2 l_3 - L_{23}^2 &= 0 \\ l_3^2 + l_1^2 + l_3 l_1 - L_{31}^2 &= 0 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} = \begin{pmatrix} 2l_1 + l_2 & 2l_2 + l_1 & 0 \\ 0 & 2l_2 + l_3 & 2l_3 + l_2 \\ 2l_1 + l_3 & 0 & 2l_3 + l_1 \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} = \begin{pmatrix} -2L_{12} & 0 & 0 \\ 0 & -2L_{23} & 0 \\ 0 & 0 & -2L_{31} \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \dot{\mathbf{X}} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} \dot{\mathbf{Y}} = \mathbf{0} \quad (12)$$

$$\dot{\mathbf{X}} = - \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} \dot{\mathbf{Y}} = \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{Y}} \dot{\mathbf{Y}} \quad (13)$$

$$\dot{\mathbf{Y}} = - \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \dot{\mathbf{X}} = \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \mathbf{X}} \dot{\mathbf{X}} \quad (14)$$

4.2.2.4. Права задача на кинематиката

Състои се в намиране на радиус-вектора $\mathbf{r}$ на центъра на платформата O_p спрямо центъра на основата O_b и ориентацията на платформата, изразена чрез нормалния ъ вектор $\mathbf{n}$, съвпадащ с $\mathbf{e}_{p3}$, при известни обобщени координати $\mathbf{q} = (q_1 \ q_2 \ q_3)^T$. Първата стъпка от решаването на правата задача се състои в решаване на (11) за $\mathbf{X}$, при зададен $\mathbf{Y}_d$.

$$\mathbf{Y}_d = (\|\mathbf{r}_{P_1 P_2}\| \ \|\mathbf{r}_{P_2 P_3}\| \ \|\mathbf{r}_{P_3 P_1}\|)^T$$

Първоначалната стойност на $\mathbf{X}$ съответства на $q_1 = q_2 = q_3$, така че $\mathbf{X}_0 = (R \ R \ R)^T$, където $R = |O_p P_1| = |O_p P_2| = |O_p P_3|$ представлява радиусът на платформата. Първоначалната стойност на $\mathbf{Y}$ е $\mathbf{Y}_0 = (R\sqrt{3} \ R\sqrt{3} \ R\sqrt{3})^T$. При известни $\mathbf{Y}_d$, $\mathbf{X}_0$ и $\mathbf{Y}_0$, стойността на $\mathbf{X}$, съответстваща на $\mathbf{Y}_d$ се определя посредством популярната итеративната процедура Нютон-Рафсън за решаване на нелинейни системи:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{X}_{k-1} + \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{Y}} (\mathbf{Y}_d - \mathbf{Y}_{k-1}) \quad k=1, 2 \dots$$

Обикновено, намирането на много точно решение на уравнението $\mathbf{X}_d = \mathbf{X}(\mathbf{Y}_d)$ отнема 2-3 итерации. С определянето на $\mathbf{X}_d$, изчисляването на радиус-вектора $\mathbf{r}$ на центъра на платформата спрямо центъра на основата и съответната ориентация на платформата, се осъществява недвусмислено:

$$\mathbf{n} = (\mathbf{r}_{P_1 P_2} \times \mathbf{r}_{P_2 P_3}) / \|\mathbf{r}_{P_1 P_2} \times \mathbf{r}_{P_2 P_3}\|$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_{b1} + q_1 \mathbf{e}_3 + l_1 \cos(\delta) \mathbf{e}_{P_1 P_2} + l_1 \sin(\delta) (\mathbf{n} \times \mathbf{e}_{P_1 P_2}) \quad (15)$$

4.2.2.5. Обратна задача на кинематиката

Обратната задача на кинематиката на ниво позиция се състои в намиране на дължината на прътите $\mathbf{q} = (q_1 \ q_2 \ q_3)^T$, свързващи основата и платформата, при задаване на позицията на платформата $z\mathbf{e}_3$, където $\mathbf{e}_3 = (0 \ 0 \ 1)^T$, както и нейната ориентация, изразена чрез желанния нормалния вектор $\mathbf{n}_d$. Той може да бъде получен в резултат на завъртането на единичния вектор $\mathbf{e}_3$ около $\mathbf{e}_1 = (1 \ 0 \ 0)$ на ъгъл α , последвано от завъртане на получения вектор $\mathbf{n}_\alpha$ около $\mathbf{e}_2 = (0 \ 1 \ 0)$ на ъгъл β . Впоследствие, векторът $\mathbf{q}$ може да бъде дефиниран като:

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} \frac{(z\mathbf{e}_{b3} - \mathbf{r}_{b1}) \cdot \mathbf{n}_d}{\mathbf{e}_{b3} \cdot \mathbf{n}_d} \\ \frac{(z\mathbf{e}_{b3} - \mathbf{r}_{b2}) \cdot \mathbf{n}_d}{\mathbf{e}_{b3} \cdot \mathbf{n}_d} \\ \frac{(z\mathbf{e}_{b3} - \mathbf{r}_{b3}) \cdot \mathbf{n}_d}{\mathbf{e}_{b3} \cdot \mathbf{n}_d} \end{pmatrix} \quad (16)$$

4.2.2.6. Разширен подход за моделиране на GPR

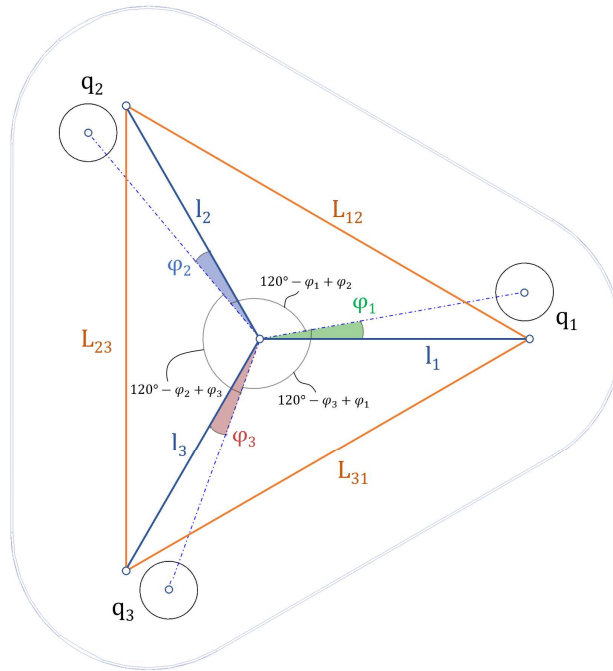
В тази подточка се разглежда разширяване на първоначалния подход за моделиране чрез въвеждане на нови три виртуални връзки към GPR платформата, този път – ротационни. Допълващи към вече създадените транслационни виртуални връзки, чиито оси съвпадат със съответните радиус-вектори $\vec{O_p P_k}$, новите връзки осигуряват извършването на завъртане на тези оси около нормалния вектор на платформата, съответно на ъгли φ_1, φ_2 и φ_3 . Целта на създаването на подобен разширен подход за моделиране на GPR има отношение към стремежа за отчитане на несъвършенствата/податливостта на компонентите на механизма във всички направления (не само радиално, но и по посока, перпендикулярна на l_1, l_2 и l_3), допринасяйки за осъществяването на все по-реалистично описание на поведението на механизма, съответстващо на реалното устройство в максимална степен.

- **Вектор X, в термините на l и φ координати**

Отчитайки разширения подход за моделиране, геометрията на GPR механизма може да бъде представена чрез следните параметри $\mathbf{X} = (l_1 \ l_2 \ l_3 \ \varphi_1 \ \varphi_2 \ \varphi_3)^T$ и $\mathbf{Y} = (L_{12} \ L_{23} \ L_{31})^T$ – Фигура 4.24. Цилиндричните и сферичните връзки налагат следните ограничения върху $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Y}$:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0$$

$$\begin{aligned} l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos(120^\circ - \varphi_1 + \varphi_2) - L_{12}^2 &= 0 \\ l_2^2 + l_3^2 - 2l_2l_3 \cos(120^\circ - \varphi_2 + \varphi_3) - L_{23}^2 &= 0 \\ l_3^2 + l_1^2 - 2l_3l_1 \cos(120^\circ - \varphi_3 + \varphi_1) - L_{31}^2 &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

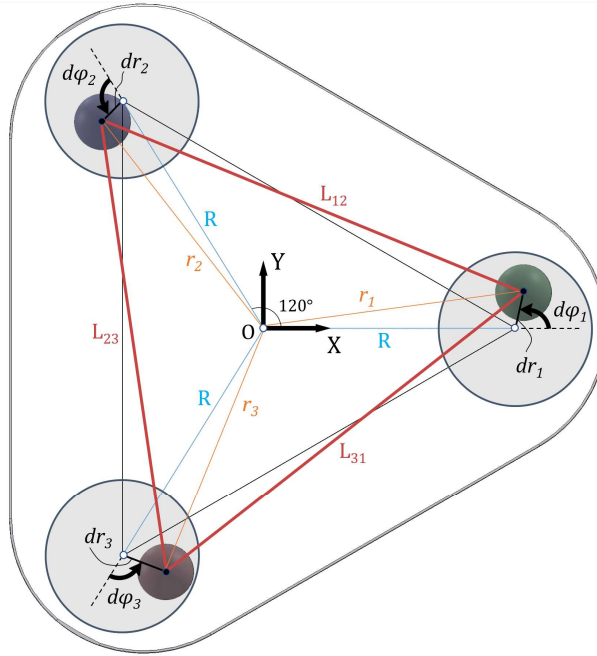


Фигура 4.24. Геометрия на разширения модел на GPR (l и φ координати).

- **Вектор X, в термините на цилиндрични координати dr и $d\varphi$**

Друг възможен начин за описание на мобилността на GPR механизма, базирайки се на разширената концепция с три транслационни и три ротационни виртуални връзки, е свързан с въвеждането на нов вектор $\mathbf{X}$, който е дефиниран в термините на цилиндричните координати dr и $d\varphi$ – Фигура 4.25. В сравнение с предишния подход (базиран на l и φ

координати), при който зоната на несъвършенства на сферичните стави на платформата заема формата на част от диск, разширеният вектор $\mathbf{X}$, въведен в тази подточка, пресъздава по-реалистичния сценарий, при който се наблюдава равномерно разпределение на хлабините и еластичностите на сферичните стави, заемайки формата на окръжност.



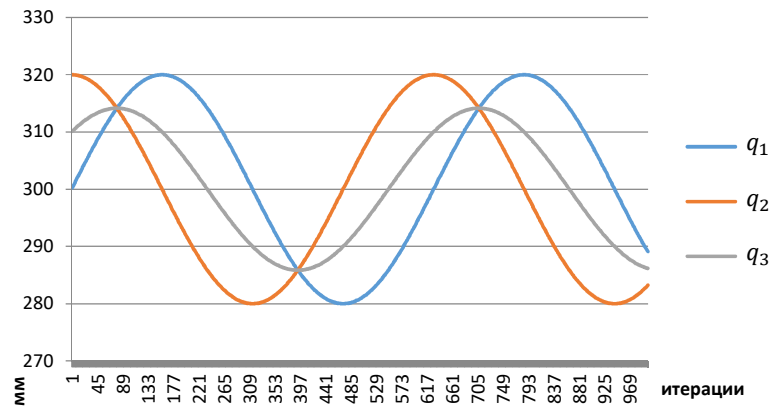
Фигура 4.25. Геометрия на разширения модел на GPR ($d\mathbf{r}$ и $d\boldsymbol{\varphi}$ цилиндрични координати).

Отчитайки този модифициран метод за моделиране, описан по отношение на цилиндрични координати, геометрията на GPR може да бъде представена чрез следните параметри:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1 &= (R + dr_1 \cos(d\varphi_1) \quad dr_1 \sin(d\varphi_1))^T \\ \mathbf{r}_2 &= (R \cos(120^\circ) + dr_2 \cos(120^\circ + d\varphi_2) \quad R \sin(120^\circ) + dr_2 \sin(120^\circ + d\varphi_2))^T \\ \mathbf{r}_3 &= (R \cos(240^\circ) + dr_3 \cos(240^\circ + d\varphi_2) \quad R \sin(240^\circ) + dr_3 \sin(240^\circ + d\varphi_3))^T \\ (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)^T (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) - L_{12}^2 &= 0 \\ (\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_2)^T (\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_2) - L_{23}^2 &= 0 \\ (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_3)^T (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_3) - L_{31}^2 &= 0 \end{aligned}$$

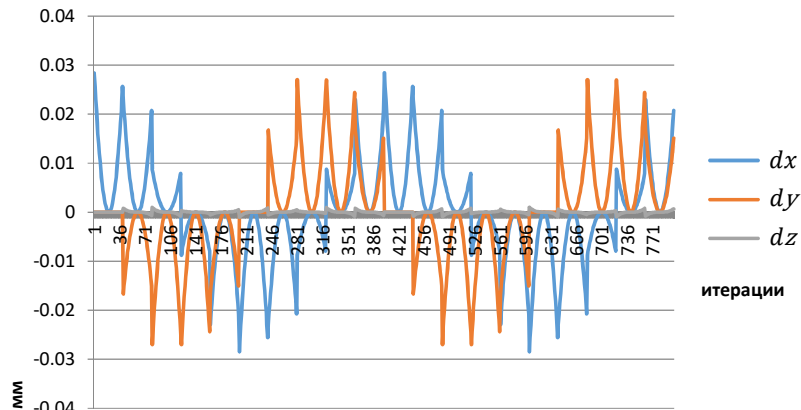
4.2.2.7. Симулация на основен GPR модел с три виртуални връзки

Обосноваността на предложения първоначален подход за моделиране и анализ на точността и мобилността на GPR механизма, базиран на три транслационни виртуални връзки, се верифицира посредством извършването на две компютърни симулации, чиито осъществяване е допълнително подпомогнато от CAD пакета SolidWorks. Основният фокус на първото симулационно изследване се състои в експериментално изразяване на зависимостта между движението на виртуалните връзки и движението на платформата, и по-специално – в намиране на границите на нормите $\|d\mathbf{X}\|$ и $\|d\mathbf{Y}\|$, съответстващи на зададена $\|d\mathbf{P}\|$, и границите на $\|d\mathbf{P}\|$, съответстващи на зададена $\|d\mathbf{X}\|$. За целта се дефинира циклично движение на GRP механизма, осигуряващо постоянното изменение на обобщените координати q_1 , q_2 и q_3 , така че механизмът периодично преминава през сингулярна конфигурация, при която $q_1 = q_2 = q_3$ (Фигура 4.26).



Фигура 4.26. Обобщени координати (q_1, q_2, q_3) съответстващи на първи симулационен сценарий.

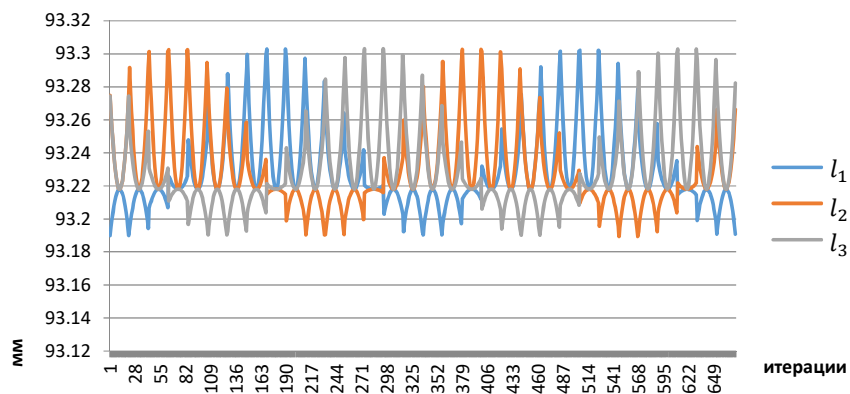
Основната цел на второто симулационно изследване е да се даде количествено оценка на движението на виртуалните плъзгащи връзки и движението на центъра на платформата, съответстващи на нейното завъртане в интервала $[-2^\circ, 2^\circ]$. Фигура 4.34 илюстрира отместването $d\mathbf{r}$ на центъра на платформата по направлението на единичните вектори $\mathbf{e}_{p1}, \mathbf{e}_{p2}, \mathbf{e}_{p3}$, респективно изразено чрез dx, dy и dz . Както става ясно от съответната графика, големината на dx и dy е по-малко от 30 микрона. Отклонението във вертикално направление dz е пренебрежимо малко (по-малко от 2 микрона).



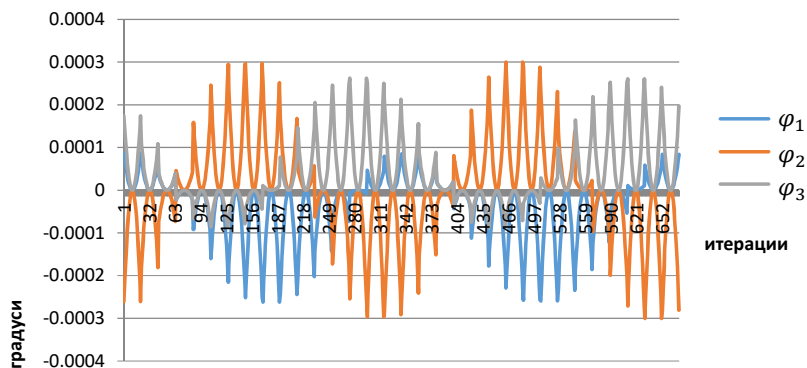
Фигура 4.34. Премествания на центъра на платформата при наклоняване в цялата работна зона.

4.2.2.8. Симулация на разширен GPR модел (l и φ координати)

Обект на второто основно симулационно изследване е разширеният модел на GPR механизма, описан с помощта на шест виртуални връзки – три транслационни и три ротационни – в термините на l и φ координати. Целта е да се установи зависимостта между ориентацията на платформата и параметрите, характеризиращи позицията на виртуалните връзки, описани чрез вектори $\mathbf{X} = (l_1 \ l_2 \ l_3 \ \varphi_1 \ \varphi_2 \ \varphi_3)^T$ и $\mathbf{Y} = (L_{12} \ L_{23} \ L_{31})^T$. Фигура 4.39 и Фигура 4.40 изобразяват изменението на вектора $\mathbf{X}$. От съответните графики става ясно, че промените на ъглите φ_1, φ_2 и φ_3 , представлящи движението на ротационните виртуални връзки, са пренебрежимо малки. Този факт доказва, че първоначалният избор за тримерен вектор $\mathbf{X}$, описан в подточка 4.2.2.2, представлява адекватно решение за виртуализация на GPR механизма, допринасящо за точното описание на неговите движения.



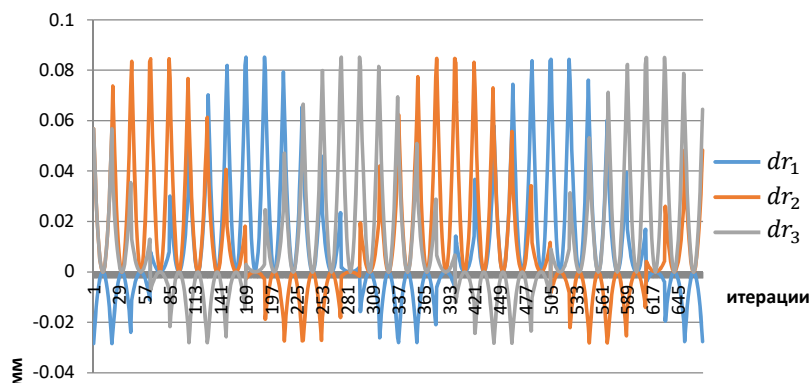
Фигура 4.39. Линейни компоненти на вектор X (транслационни виртуални връзки).



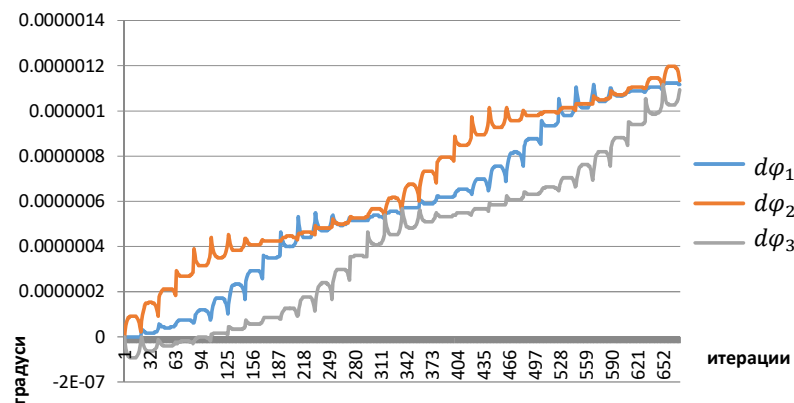
Фигура 4.40. Ъглови компоненти на вектор X (ротационни виртуални връзки).

4.2.2.9. Симулация на разширен GPR модел (l и φ координати)

Финалното симулационно изследване на GPR механизма е насочено към неговия разширен модел, описан с помощта на шест виртуални връзки (три транслационни и три ротационни), изразени в термините на цилиндрични координати dr и $d\varphi$. Аналогично на предходните симулации, целта е установяване на зависимостта между наклоняването на платформата и параметрите, характеризиращи поведението на виртуалните връзки, дефинирани чрез вектори $\mathbf{X} = (dr_1 \ dr_2 \ dr_3 \ d\varphi_1 \ d\varphi_2 \ d\varphi_3)^T$ и $\mathbf{Y} = (L_{12} \ L_{23} \ L_{31})^T$. В резултат на дефинираното входящо движение се осъществява изменение на разширения вектор $\mathbf{X}$, чийто линейни (dr) и ъглови ($d\varphi$) компоненти се изменят съгласно графиките, показани съответно на Фигура 4.47 и Фигура 4.48.



Фигура 4.47. Линейни компоненти dr на вектор X .



Фигура 4.48. Ъглови компоненти $d\varphi$ на вектор X .

Извършеното моделиране и формалното описание на хибридна структура и геометрия на роботите за пренасяне на силициеві пластини, съставена от равнинна серийна ръка тип SCARA и свръхограничена паралелна GPR платформа, позволява успешното интегриране и адаптиране на разработената симулационна система към същността на специалните манипулатори за полупроводниковата индустрия, което на свой ред дава възможност за извършването на разнообразни задачи, свързани с прецизно анализиране на потребителски сценарии, офлайн програмиране и създаване на презентационни материали за рекламни и маркетингови цели, демонстрирани в Глава 5.

ГЛАВА 5. ФУНКЦИОНАЛНОСТ И ПРИЛОЖИМОСТ НА РАЗРАБОТЕНАТА СИСТЕМА

Реализирането на споменатите задачи има ключово значение за общата приложимост и ефективност на разработената симулационна система в областта на автоматизацията на полупроводниковата индустрия и е решаващо за нейното ефикасно използване за различни проекти и клиентски задачи. Поради тази причина е изключително важно извършването на проверка на функционалността и гъвкавостта на създаденото приложение, потвърждавайки неговата съвместимост с цялата гама от манипулатори за пренасяне на силициеві пластини, произвеждани от Genmark Automation, Inc. В резултат на извършените верификационни процедури, описани в текущата глава, се доказва, че SolidWorks API-базираната система представлява ефективен и прецизен инструмент за симулация на движенията и офлайн програмиране, приложим за всички роботи и оборудване, произвеждани от компанията. Финалните въпроси, адресирани в Глава 5, се отнасят към демонстриране на трите основни практически приложения на разработената симулационна система, свързани с анализиране на потребителски задачи, офлайн програмиране и създаване на презентационни материали, спомагащи за изпълнението на разнообразни рекламни и маркетингови дейности.

5.1. Анализ на функционалността, съвместимостта и гъвкавостта

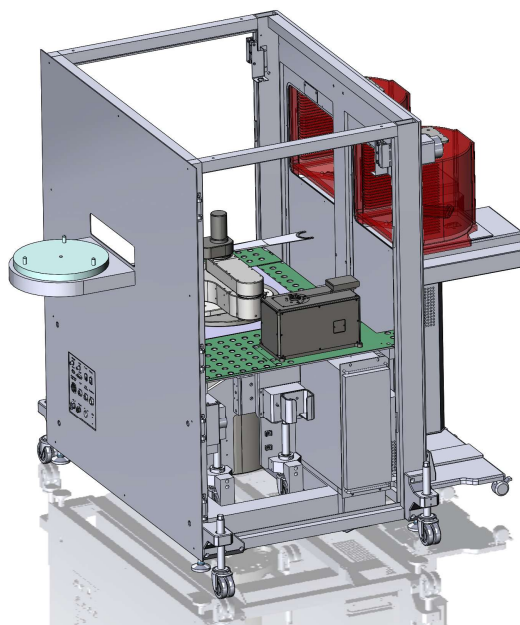
Адаптирането на разработеното VBA приложение към манипулатори за пренасяне на силициеві пластини може да се разглежда като ключов етап от процеса на създаване на ефективна и пълнофункционална система за симулация на роботи в Genmark Automation, Inc, която се базира на две основни библиотеки – библиотека, съдържаща SolidWorks API-съвместими сглобени единици на всички роботи, и библиотека, съдържаща съответните (.swp) макро програми. Наличието на тези две библиотеки е критично за функционирането, ефективността и използваемостта на разработената система, тъй като разнообразието от продукти, произвеждани от Genmark Automation, Inc., както и естеството на самите проекти и потребителски задачи изискват 3D моделите на всички роботи и оборудване, заедно със

съответните VBA макро приложения, да бъдат на разположение и готови за използване във всеки един момент.

След успешното адаптиране и интегриране на цялата гама манипулатори и оборудване, произвеждани от Genmark Automation, Inc., към SolidWorks API-базираната симулационна система е необходимо извършването на проверка на нейната функционалност. Целта е да се гарантира коректното изграждане на всички 3D сглобени единици и съответните им .swp макро програми, отговаряйки на всички изисквания за точност, наложени от специфичните приложения. С други думи, задачата се стреми към верифициране на пълното съответствие между симулационния процес, извършван във виртуалната SolidWorks среда и поведението на реалните системи, което е ключово изискване за ефективността и приложимостта на разработеното приложение.

5.2. Анализиране на потребителски сценарии

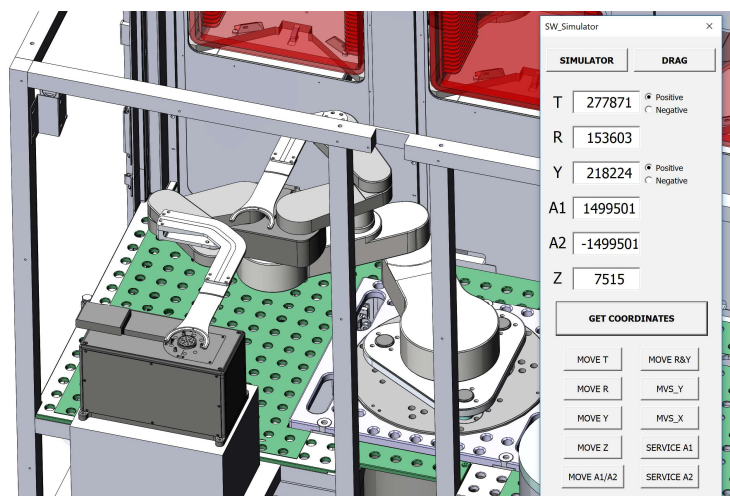
Ефективното анализиране на потребителски сценарии представлява задача, имаща съществен принос за успешното реализиране на разнообразни бизнес проекти, което от своя страна има важно влияние върху продуктивността на полупроводниковите производствени предприятия. Процеса на анализиране на потребителски сценарии, обединяващ прецизно изследване, оценяване и оптимизиране на геометрията на използваните системи, проверка на съвместимостта на роботите, оценка на производителност и достижимост, проверка за интерференции и много други, е мотивиран от все по-високите изисквания на клиентите, имащи отношение към провеждането на предварителни тестове и симулации, гарантиращи ефикасното и безпроблемно функциониране на манипулаторите за пренасяне на силициеви пластини, интегрирани в технологичните системи [115, 116]. От представеното описание на всички полезни дейности, свързани с анализирането на потребителски сценарии, както и на същността на самия процес, става ясно че задачата изисква обединяване на симулационните сглобени единици на роботите със статичните модели на специфичните технологични машини и оборудване, предоставени от съответните клиенти [117] (Фигура 5.8). Подобен интегриран подход допринася за създаването на високоефективни сглобени единици, които спомагат за прецизното представяне на цялостната автоматизирана система, позволявайки извършването на разнообразни задачи, свързани с анализиране на потребителски сценарии, по бърз и ефикасен начин.



Фигура 5.8. Примерна система, използвана за верификация на анализирането на потребителски сценарии.

5.3. Офлайн програмиране

Занимаваща се с разнообразни проблеми, свързани със сложни интегрирани системи, често съставени от множество манипулатори, допълнителни устройства, процесни станции, и специфично оборудване, автоматизацията на полупроводниковата индустрия подчертава необходимостта от извършване на предварително и дистанционно обучение на системите, още преди произвеждането и внедряването на физическите устройства. Подобен подход за офлайн програмиране предлага множество предимства, в това число редуциране на времето за настройка и обучение на реалните системи, по-надеждно функциониране на роботи и оборудване, оптимизирана работа на устройствата, както и избягването на потенциални проблеми, свързани с достижимост, интерференции, несъвместимост, инциденти, и други. В тази връзка, второто основно приложение на разработената симулационна система в областта на автоматизацията на полупроводниковата индустрия се съсредоточава върху извършването на прецизно офлайн програмиране. Както е вече споменато в предходни раздели на дисертацията, SolidWorks API-базираната система (стартирана в режим 'Drag') предлага функцията 'Извличане на координати', която позволява ръчното преместване на сглобените единици на роботите в графичната SolidWorks среда и последващото извличане на стойностите на всички ставни координати/логически оси, съответстващи на конкретната позиция/ориентация на манипулаторите (Фигура 5.13). Получените данни могат лесно да бъдат въведени в управляващия софтуер на роботите, спомагайки за осъществяването на ефективно обучение на станции, ключови за успешното изпълнение на конкретното потребителско приложение.

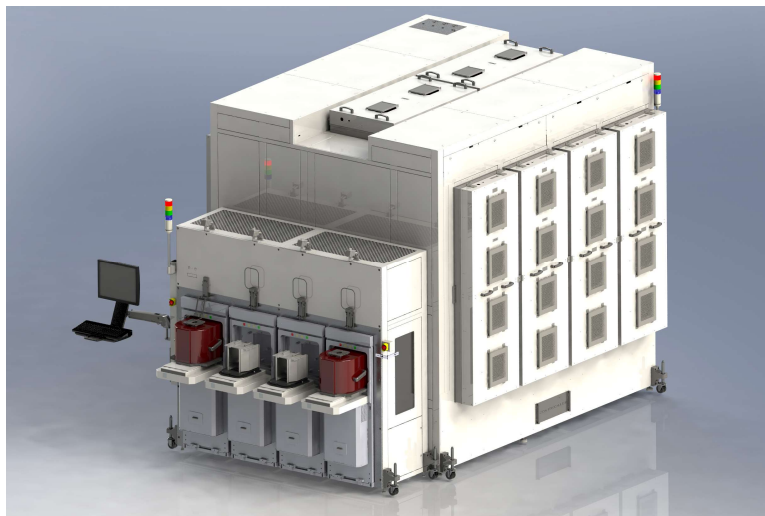


Фигура 5.13. Извличане на координати, съответстващи на обслужването на конкретна станция.

5.4. Създаване на висококачествени презентационни материали

Третото основно приложение на разработената система за симулация на движенията и офлайн програмиране на манипулатори за полупроводниковата индустрия е свързано със създаването на висококачествени презентационни материали, полезни за извършването на разнообразни рекламни и маркетингови дейности. Проектирайки и произвеждайки голямо разнообразие от поръчкови системи и оборудване за автоматизация на различни индустрии, свързани с полупроводникови устройства, плоски екрани, соларни панели, LED, записващи устройства и други, Genmark Automation, Inc. (и всяка друга производствена компания като цяло) изпитва сериозна нужда от възможност за адекватно и ефективно презентиране на собствените си продукти пред потенциални клиенти, с помощта на създадени за целта мултимедийни материали. Основната цел на подобни презентационни средства (най-често видеоклипове и анимации) се състои в осигуряването на подробна информация, свързана с цялостната концепция на специфичното оборудване – размери, принцип на работа, брой

компоненти, геометрични ограничения, производителност, технически характеристики и много други. Възможността за възприемане на всички тези фундаментални характеристики на автоматизираната система под формата на интерактивни презентации допринася за улесняването на потребителите при процеса на разбиране и вземане на правилни решения, свързани със съвместимостта на съответния продукт с техните специфични изисквания и ограничения. В тази връзка, възможностите за реалистични симулации на движенията на разработената система, комбинирани с интегрираните в SolidWorks инструменти за записване на подвижни и неподвижни графични изображения, позволяват създаването на висококачествени и реалистични анимационни и снимкови материали, които изчерпателно представят автоматизираните системи, допринасяйки за осъществяването на полезните дейности, описани в предходните подточки (Фигура 5.15).



Фигура 5.15. Реалистично изображение на комплексна система за съхраняване и сортиране на силициеви пластини с висок капацитет, произведена от Genmark Automation, Inc.

ГЛАВА 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ)

Представената дисертация предлага разнообразни приноси и нововъведения в множество области, в това число симулиране на движенията на роботи, системи за офлайн програмиране, моделиране и симулация чрез универсални CAD програми, анализиране на потребителски задачи на манипулатори за пренасяне на силициеви пластини, моделиране и симулация на свръхограничени паралелни механизми, и други. Гореспоменатите могат да бъдат разделени в две основни категории – научно-приложни и приложни приноси.

Научно-приложни приноси:

1. Създадена е ефективна система за моделиране, симулация на движенията и офлайн програмиране на клас работи в полупроводниковата индустрия, чрез универсален CAD софтуер.
2. Разработен е аналитичен подход за моделиране, анализ и симулация на движенията на свръхограничен паралелен механизъм, широко използван в автоматизацията на полупроводниковата индустрия.
3. Предложена е универсална, гъвкава и надеждна концепция за изследване и симулиране на движенията на разнообразни работи и механизми, без ограничения в тяхната структура, вид, геометрия и област на приложение.

4. Реализирана е интегрирана платформа, базирана на приложно-програмния интерфейс SolidWorks API и на специално създадена VBA програма, позволяващи едновременно извършване на симулационни и проектантски дейности, използвайки съществуващите 3D модели на манипулаторите.

Приложни приноси:

1. Разработената система за е успешно внедрена във фирма Genmark Automation, Inc. и е ефективно използвана в множество проекти, потребителски задачи и изложения.
2. Извършени са задълбочени анализи на потребителски сценарии, оценявайки осъществимостта и продуктивността на автоматизирани системи, изследвайки и оптимизирайки множество ключови за тяхното функциониране фактори.
3. Осъществено е прецизно офлайн програмиране на системите, позволявайки тяхното предварително настройване и точно обучение от разстояние, без да е необходимо наличието на физическото оборудване.
4. Създадени са висококачествени презентационни материали, успешно използвани за рекламни и маркетингови дейности, даващи подробна информация, свързана с цялостната същност на автоматизирани системи.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Братованов Н., Заманов В., Моделиране и симулация на движенията на клас манипулационни роботи и анализиране на потребителски сценарии в полупроводниковата индустрия, Годишник на Технически университет – София, ISSN 1311-0829, том 65, книга 1, стр. 99–108, 2015.
2. Братованов Н., Заманов В., Моделиране и симулация чрез SolidWorks API на роботи за манипулиране на силициевы пластини, Годишник на Технически университет - София, ISSN 1311-0829, том 66, книга 2, стр. 71–80, 2016.
3. Bratovanov N., Sotirov Z., Zamanov V., Modeling and Simulation of Overconstrained Closed-Loop Mechanisms, Proceedings of Technical University of Sofia, ISSN 1311-0829, vol. 67, issue 2, pp. 81–90, 2017.
4. Bratovanov N., Sotirov Z., Zamanov V., Mobility and Accuracy Analysis of a Class of Overconstrained Parallel Mechanisms, Mechanics of Machines, ISSN 0861-9727, Year XXVI, issue 2, pp. 26–32, 2018.
5. Bratovanov N., Robot Modeling, Motion Simulation and Off-line Programming Based on SolidWorks API, Proceedings of The Third IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), ISBN 978-1-5386-9245-5, vol. 1, pp. 574–579, 2019.

MODELING, SIMULATION AND OFFLINE PROGRAMMING OF A CLASS OF ROBOTS FOR THE SEMICONDUCTOR INDUSTRY

Nikolay Bratovanov

A relatively recent technology, oriented towards industrial robotics and tool automation has been focusing on modeling, motion simulation, and offline programming of robots and manipulators, applicable to various fields. Providing a number of beneficial functionalities associated with comprehensive studies of the robotic systems, preliminary verification and optimization procedures, precise offline programming and layout analysis tasks, all carried out in an interactive virtual environment, this simulation-oriented technology has become a key ingredient in the successful implementation of present-day solutions for industrial automation. However, regardless of the rather great variety of available robot simulation and offline programming software, there are multiple issues associated with the systems' efficiency, applicability, and versatility, which limit their usability, especially in specific fields where robots and mechanisms with special features and characteristics are used. The work presented in this thesis focuses on eliminating these issues by developing a general-purpose modeling, motion simulation and offline programming tool, based on the universal SolidWorks 3D CAD software and its powerful application programming interface (API). In addition to the advanced procedures for connecting to the robot motion control software, performing efficient offline programming tasks, simulating object handling operations, and providing intuitive graphical user interface, the proposed approach uses the 3D models of the simulated manipulators and mechanisms that have already been created for design and manufacturing purposes, thus facilitating the simultaneous execution of exhaustive motion simulation and design modification/optimization tasks. In this way, the developed system has been successfully utilized with various industrial applications, and particularly with the field of semiconductor device manufacturing.

Employing a special type of substrate handling manipulators, semiconductor industry automation imposes that precise kinematic modeling of the robots' specific hybrid parallel-serial structure is implemented, in order for their motion to be accurately simulated. In this regard, two main approaches, dealing with modeling, studying and analyzing the mobility of the serial planar 'SCARA-type' arm and the overconstrained parallel GPR platform, characteristic for the majority of substrate handling robots, are respectively developed and presented throughout the thesis. In addition to its scientific contributions associated with modeling and simulation of overconstrained parallel mechanisms and implementation of a versatile robot simulation approach, the work provides numerous practical benefits related to the performance of multiple semiconductor industry automation-oriented tasks, including realistic motion simulations of substrate handling robots, in-depth layout analyses of various integrated automation systems, precise offline programming of manipulators and equipment, manufactured by a specific company in the field, and production of high-quality presentation and demo materials, utilized for marketing and advertising purposes. The successful realization of the practical applications mentioned above facilitates the implementation of a highly efficient and versatile system, which has a direct impact on the efficiency and productivity of present-day tool automation companies and semiconductor device manufacturing fabs, optimizing the quality of the final products, reducing costs, saving time, effort and resources. The effective employment of the proposed SolidWorks API-based motion simulation and offline programming system in various important projects and business cases further contributes to the significance of the presented thesis, certificating its novelty, recentness, and applicability.