

Федеральное государственное бюджетное
Образовательное учреждение высшего образования
МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Эраки Мохамед Тахер Хамед

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ МАНИПУЛЯТОРОМ
ДЛЯ РОЗЛИВА И МАРКИРОВКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ**

**Специальность 05.13.06 - Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами
(в пищевой промышленности)**

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Кандидат технических наук, доцент
Зубов Дмитрий Владимирович

Москва 2019

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Задачи исследования:	7
Научная новизна:	7
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	11
1.1 Научные основы создания автоматизированных линий пищевых производств	11
1.2 Исследование кинематики робота-манипулятора	16
1.3 Исследование динамики робота-манипулятора	19
1.4 Управление роботом-манипулятором	20
1.5 Исследование и управление компьютерного и машинного зрения	22
Выводы по главе 1	24
ГЛАВА 2. Кинематика робота манипулятора	25
2.1 Кинематика робота манипулятора	25
2.2 Программное обеспечение прямой и обратной кинематики вращательного движения робота-манипулятора с тремя степенями свободы	25
2.3 Разработка траектории и решение задачи обратной кинематики управления SCARA робота-манипулятора с помощью LabVIEW и SolidWorks .	41
2.4 Исследование программного обеспечения обратной кинематики робота-манипулятора KUKA и оптимальное управление траекторией	55
Выводы по главе 2	68
ГЛАВА 3. Исследование динамики управления манипулятором робота	69
3.1 Управление и исследование динамики робота-манипулятора с использованием программных пакетов LabVIEW и SolidWorks	69
3.2 Разработка системы управления манипуляторами роботом-манипулятором	

PUMA 560, работающим на солнечных батареях	77
Выводы по главе 3	89
ГЛАВА 4. Экспериментальное исследование	91
4.1 Экспериментальное исследование системы отслеживания цветных объектов с использованием технического зрения	91
4.2 Система машинного зрения (MVS).....	92
4.3 Цветовые модели RGB (КЗС – красный, зеленый, синий) и HSV	95
4.4 Экспериментальная работа	97
Выводы по главе 4	103
Заключение	104
Перечень сокращений и условных обозначений	105
Список литературы.....	108

Введение

Актуальность темы исследования

Современные производства характеризуются большой степенью замены человеческого труда машинным. В ряде отраслей, связанных с опасностью для человека из-за условий пожаро- и взрывоопасности, токсичности веществ обрабатываемых – в химической технологии, нефти и газо-переработке, либо – при нежелательности воздействия человека на технологический процесс – из соображений стерильности и асептики. В этом случае необходима замена ручного труда на автоматизированные линии [9].

К концу 70-х годов XX века стало очевидно, что традиционные технологические линии очень быстро устаревают, не успевают окупаться, требуют сложной доработки для перехода на другую продукцию. Особенно актуальна данная проблема для малотоннажных и сезонных производств, широко распространённых в отрасли переработки продукции сельского хозяйства, в пищевой промышленности. Одним из способов повышения гибкости и универсальности технологических линий является широкое использование методов кибернетики, автоматизации и интеллектуального управления. Большим сторонником внедрения кибернетических методов в промышленность были академик В.В. Кафаров [10, 11], профессор А.И. Бояринов и ряд других учёных, заложивших основы моделирования и автоматизации сложных производственных линий. Несколько ранее, академиком АН СССР И.И. Артоболевским были разработаны общие принципы создания машин-автоматов, в том числе применительно к пищевой промышленности [1].

Пищевая промышленность – одна из самых динамично развивающихся отраслей экономики. Новые технические возможности позволяют радикально решать типичные проблемы пищевых производств, связанные с соблюдением требований соблюдения микробиологического режима, предотвращение контаминации, устранения ручного труда и связанных с ним технологических потерь, повышения стабильности уровня качества продукции, дают возможность оперативно изменять ассортимент и производительность предприятия. Ввиду большого количества ручного труда, перспективно применение робототехнических

комплексов, которые позволяют обеспечить большую гибкость производства, в том числе в задачах перемещения отдельных полуфабрикатов, заготовок, маркировки готовой продукции, особенно для малотоннажных производств, обладающими оборудованием, позволяющим производить различную продукцию по отдельным заказам. Ввиду высокой конкуренции на рынке напитков, производители вынуждены организовывать производство сезонных или приуроченных к каким-либо знаменательным событиям серий продукции, отличающихся не только составом напитков, но и видом бутылок и маркировки, что делает невозможным применение типовых автоматических линий, использующих традиционную тару и не поддающуюся существенной перенастройке.

Прогресс в развитии компьютерных технологий сделал возможным решение задач распознавания взаимного расположения физических объектов в режиме реального времени и управления исполнительными устройствами на основе предикторных адаптивных моделей, что позволяет снизить затраты энергии и повысить надёжность, безопасность и производительность агрегатов гибких линий пищевых производств.

Для того, чтобы машины и агрегаты гибких автоматизированных линий пищевых производств могли выполнять заданные задачи, необходимо выработать траектории перемещений исполнительных органов манипуляторов, а для их реализации – законы изменения скоростей, сил и моментов соответствующих приводных устройств. Для поиска и реализации алгоритма управления манипуляторами для решения задач пищевого производства необходимо использование математических моделей процессов, протекающих в ходе работы производственной линии.

Из вышесказанного следует, что проблема обеспечения динамично развивающейся пищевой промышленности универсальными программно-аппаратными средствами управления робототехническими комплексами актуальна.

С конца XX века, роботы способствовали повышению производительности различных отраслей. Высокий спрос на использование роботов-манипуляторов вызван необходимостью сокращения расходов на персонал, снижения непроизводительных затрат времени работы и повышения безопасности, точности и эффективности производства. Для того, чтобы использовать робота-

манипулятора для выполнения конкретных задач необходимо контролировать его, то есть, во-первых, конструировать траектории для манипулятора (с точки зрения позиций и скоростей) и, во-вторых, определения реальных положения и скорости манипулятора. Также ценной является возможность контроля силы реакции. Для реализации алгоритма управления манипулятором необходимо контролировать его перемещения, что предполагает разработку специализированного программного обеспечения.

Степень разработанности темы исследования. Одним из самых распространённых агрегатов в промышленности являются манипуляторы типа PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly) и манипуляторы типа SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm). Это серийно выпускаемые промышленные манипуляторы, предназначенные для использования в промышленных приложениях, имеют 6 вращательных степеней свободы (PUMA) и 4 вращательные и 2 поступательных степеней свободы (SCARA). Связь между приложенными силами и перемещениями звеньев манипуляторов определяется кинематикой и динамикой. Механизм манипулятора рассматривается как последовательная цепь жестких звеньев, соединенных друг с другом вращательными или поступательными соединениями. Преобразование положения и ориентации конечных эффекторов робота-манипулятора из декартова пространства в совместное пространство называется задачей обратной кинематики. Для решения этой задачи традиционно используется матричный метод Денавита-Хартенберга, который использует матрицы 4x4 координат, который весьма требователен к вычислительным ресурсам и точности определения физических параметров, поэтому много внимания уделяется поиску упрощённых вычислительных схем, либо методов управления, основанных на методах и подходах искусственного интеллекта. Множество работ в этой области, особенно зарубежных авторов, свидетельствует об актуальности и востребованности выбранной темы исследования в задачах мехатроники.

Целью работы является повышение эффективности работы пищевого предприятия за счёт разработки и внедрения автоматизированной системы управления технологическим манипулятором с несколькими степенями свободы на основе имитационной модели.

Задачи исследования:

1. Создание математических моделей многозвенных технологических манипуляторов типов SCARA, PUMA, KUKA, обеспечивающих сохранение заданной точности позиционирования во всём пространстве рабочей зоны.

2. Разработка алгоритма управления технологическим манипулятором, обеспечивающим оптимизацию заданного критерия в условиях ограничений (по мощности источника питания и по геометрии рабочей зоны).

3. Разработка структуры распределённой системы управления и моделирования технологического манипулятора, разделяющей функции текущего управления перемещением и моделирования с учётом физических свойств манипулятора и объектов.

4. Разработка и исследование системы компьютерного зрения для отслеживания движущихся по технологической линии объектов, камерой расположенной на движущемся манипуляторе.

5. Разработка динамических и управляющих конструкций роботов манипуляторов SCARA и PUMA 560, с использованием (LabVIEW) и (SolidWork), для управления вращательными и линейными двигателями модели.

Научная новизна:

1. Разработан новый метод поиска управления манипулятором при помощи кинематического анализа с учётом особенностей рассмотренных типовых манипуляторов, позволяющий снизить вычислительные ошибки расчёта траектории и таким образом обеспечить заданную точность позиционирования во всей рабочей зоне.

2. Предложен новый метод решения задачи имитационного моделирования технологического манипулятора, отличающийся распределением функций между программными средами – быстрой (LabVIEW) и медленной, точной (SolidWork), позволяющий рационально использовать вычислительные ресурсы.

3. Разработаны алгоритмы динамического анализа манипуляционных механизмов для системы технологического транспорта.

4. Разработан метод контроля траектории манипулятора, позволяющий избегать нежелательных столкновений в рабочем пространстве.

5. Разработаны численные модели манипуляционных механизмов,

предназначенных для системы маркировки продукции.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическое значение диссертационной работы заключается в следующем:

1. Математическое описание кинематических задач управления манипулятора с требуемой конечной траекторией рабочего органа манипулятора.
2. Создание программы управления манипуляторами с моделированием их работы.
3. Структура системы управления манипуляторами PUMA 560, позволяющая обеспечить мобильность манипуляторов, учёт ограниченных возможностей систем электропитания и возможности системы оптического распознавания.
4. Проведен структурный синтез манипуляционных механизмов для поступательных и вращательных движений.
5. Проведен кинематический анализ манипуляционных механизмов для поступательных и вращательных движений PUMA, SCARA, KUKA.
6. Проведен динамический анализ манипуляционных механизмов для поступательных и вращательных движений PUMA, SCARA, KUKA.
7. Разработаны методика решения задач прямой и обратной кинематики с помощью разработанного геометрического подхода, позволяющая избежать столкновений манипулятора с окружающими объектами.

Практическая ценность диссертационной работы – модернизация системы управления технологическим манипулятором:

1. Алгоритмы решения обратной кинематической задачи для роботов типов PUMA, SCARA и KUKA, программное обеспечение, реализующее разработанные алгоритмы.
2. Система оптического распознавания объектов управления (пищевых продуктов), учитывающая совместное движение манипулятора и объектов управления.
3. Разработан программный интерфейс обратной кинематики робота-манипулятора (на примере SCARA Robot), который позволяет получить точные решения.

4. Разработана система виртуального прототипирования мехатронной автоматизированной системы управления, позволяющая выбрать контроллер управления движением манипулятора, требуемые двигатели и параметры энергетической подсистемы.

5. Разработана улучшенная модель робота PUMA 560, к которой добавлены автоматизированные средства для передвижения манипулятора.

6. Разработана и экспериментально исследована система обнаружения траектории двигающихся цветных объектов (пищевых продуктов) с использованием системы машинного зрения.

7. Разработан и внедрен (в качестве прототипа) на АО МБПК «ОЧАКОВО» аппаратно-программный комплекс для наклеивания этикеток на готовую продукцию.

Методология и методы исследования. В диссертационном исследовании были использованы теория автоматического управления, методы математического моделирования, теория принятия решений, методы сетевого планирования, методы оптимизации (динамическое программирование), теория алгоритмов и методы программирования, методы создания систем технического зрения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Структура системы управления движением манипулятора в условиях динамически изменяющейся окружающей среды.

2. Метод расчёта траекторий движения манипулятора, методика решения на его основе обратной кинематической задачи, позволяющая сохранить точность позиционирования во всей рабочей зоны.

3. Алгоритм поиска (выбора) оптимальной траектории движения манипулятора в условиях наложенных ограничений, обеспечивающий снижение вычислительных ресурсов.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Надежность полученных научных данных подтверждается результатами теоретических и экспериментальных исследований, выполненных с использованием программ моделирования SolidWorks, LabVIEW и экспериментальной проверкой отдельных частей диссертационной работы на реальных объектах.

Основные положения и результаты исследования докладывались и обсуждались на 3 международных научных конференциях: Национальный Суперкомпьютерный Форум «НСКФ-2017», (28.11–1.12.2017, г. Переславль-Залесский); IX-й Международный Симпозиум «Полимерная индустрия: Инновации. Эффективность. Ресурсосбережение», (7 – 8.12.2016, г. Москва); XXIX Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ – 29», (31.05-3.06.2016, г. Санкт-Петербург). По теме диссертации опубликовано 4 научных работы в научном журнале из списка ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации и 3 научные работы в научном журнале, индексирующихся международной реферативной базой Scopus.

Личное участие автора заключается в следующем: математическое моделирование типовых промышленных манипуляторов; разработка геометрического подхода к моделированию движения манипулятора и методика решение на его основе обратной кинематической задачи; создание необходимых программных комплексов; проведение вычислительных и натурных экспериментов; интерпретация и обобщение полученных научных результатов.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, перечня сокращений и условных обозначений, списка использованной литературы. Диссертационная работа содержит 120 страниц, 84 рисунка и 14 таблиц.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Научные основы создания автоматизированных линий пищевых производств

Промышленная революция XVIII—XIX веков создала необходимые условия для механизации производства, в частности за счёт появления энергии пара, бурного развития металлургии и металлообработки, улучшения метрологических характеристик измерительных систем, большего внимания к взаимозаменяемости узлов и деталей. В это время активно развивалась классическая прикладная механика, с появлением механических источников электрической энергии — электромашинных генераторов постоянного и переменного тока и электродвигателей оказалась возможной централизованная выработка энергии, передача её на значительные расстояния и дифференцированное использование на местах потребления. После изобретения регуляторов напряжения с начала XX века электроэнергия стала использоваться для привода производственного оборудования. Наряду с паровыми машинами, энергия которых распределялась трансмиссионными валами и ремёнными передачами по станкам, постепенно распространялся и электропривод, вначале вытеснивший паровые машины для вращения трансмиссий, а затем получивший и индивидуальное применение, т.е. станки начали оснащать индивидуальными электродвигателями.

Переход от центрального трансмиссионного привода к индивидуальному в 20-х гг. XX века, простота и надёжность индивидуального электропривода позволили создать разнообразные станки-автоматы, многопозиционные агрегатные станки и автоматические линии. Началось применение автоматизированного оборудования как в тяжёлой, так и лёгкой и пищевой промышленности, совершенствовалась транспортная автоматика, наряду с отдельными автоматами были введены в действие конвейеры с принудительным ритмом движения.

Бурный прогресс в области автоматизации (как в развитии теории, так и производстве технических средств) произошёл во время II Мировой войны и после неё продолжался дальнейший бурный рост автоматизации в промышленности, широкое внедрение в производство автоматизированного электропривода: в машиностроении, электростанциях, автоматизировались прокатные станы, нефтеперерабатывающие предприятия, газопроводы. Для производства массовой продукции были применены роторные автоматические линии. Во взрывоопасных

химических производствах получило широкое распространение телемеханическое управление процессами. Пищевая промышленность несколько отставала по темпам развития в этом аспекте.

В 20-х годах XX века рядом учёных-механиков (Л.В. Ассур, Ж. Гохман, П.Л. Чебышев, А.П. Малышев) были созданы методы не только структурного анализа, но и структурного синтеза механизмов. В конце 20х годов с трудами Л.В. Ассура познакомился И.И. Артоболевский, который в 1930 году написал монографию по применению методов Ассура к механизмам сельскохозяйственных машин. Им были написаны работы по кинематике и динамике пространственных механизмов. [1].

В конце 1930-х годов В.В. Добровольским и И.И. Артоболевским была предложена единая система классификации механизмов, состоящая из пяти семейств, каждое из которых обладает общностью методов кинематического и динамического исследования. Н.Г. Бруевич впервые вводит в теорию механизмов методы векторного анализа и получает крупные результаты в кинематическом и динамическом анализе плоских и пространственных механизмов. Г.Г. Баранов вносит крупный вклад в теорию пространственных механизмов, решив впервые задачу о положениях семизвенных пространственных механизмов. А.П. Малышев продолжил свои работы по структурному синтезу механизмов, развивая работы Сомова, Гохмана и других.

Без создания научно обоснованной классификации механизмов нельзя было систематизировать их многообразие, развить общие подходы к их анализу и синтезу. Развитая классификация механизмов создала фундамент, на базе которого можно было развивать не только вопросы структуры, но и вопросы кинематики и динамики, а позднее и вопросы контроля и управления. Благодаря работам Н.П. Раевского по методам измерений механических величин продолжают развиваться и современные работы по экспериментальной технике в теории машин и механизмов [1].

В связи с необходимостью отходить от традиционных машин, служащих инструментом для работающего на них человека, к машинам автоматическим: И.И. Артоболевский совместно с С.И. Артоболевским, В.А. Юдиным и Г.А. Шаумяном создали монографию в двух томах по анализу машин-автоматов, в которой

изложены методы анализа механизмов машин автоматического действия и показана общность подхода к задаче, в частности – в пищевой, полиграфической и станкостроительной промышленности [1].

Постепенно стало ясно, что требуется всё большая гибкость устройств и необходимо развивать новые подходы для их создания. Рассмотрев механизмы для образования плоских кривых, воспроизводящих различные математические функции, приняв во внимание, что любую алгебраическую функцию можно воспроизвести совокупностью рычажных механизмов И.И. Артоболевский сделал вывод, что могут быть воспроизведены и другие классы функции, в том числе, и со многими переменными, процессы дифференцирования и интегрирования. Поскольку использование метода «наслоения» (метод Асура), когда требуемые для воспроизводства функции расчленились на простейшие узлы, выполнявшие те или иные элементарные операции приводило к слишком сложным результатам, мало применимым на практике, то он пошел по другому пути, пытаясь создавать механизмы более простые по структуре, воспроизводившие сразу требуемую функцию. Для этого использовал принципы инверсии, системы преобразователей, дополнительно присоединяемые группы и т.д. Механизмы получались более простыми, но все-таки сложными и с малым быстродействием. Примерно с 1943 года исследовал вопрос о том, нельзя ли моделировать с помощью электротехнических средств механические системы с жесткими звеньями. Становилось ясным, что подобные системы с успехом смогут быть использованы для управления машинами-автоматами. Ознакомившись из доклада М.А. Гаврилова о «Алгебре Буля», понял, какое это могучее средство для создания рациональных систем управления [1]. Стала очевидной необходимость к использованию электрических схем для питания и электронных для управления механическими системами, так и необходимость нового математического аппарата для их проектирования и использования.

В 1986 году в издательстве "Высшая школа" вышло учебное пособие «Робототехника и гибкие автоматизированные производства» в 9 книгах [12], в котором были собраны основные результаты научных исследований, применимых в построении гибких автоматизированных линий и приведено большое количество примеров решения практических задач: рассмотрены теоретические и

практические вопросы построения робототехнических систем с элементами искусственного интеллекта; приведены основы теории формальных языков и грамматик, теории алгоритмов и теории решения задач; описаны методы машинного анализа сцен и доказательства теорем, принципы построения интеллектуального интерфейса на основе диалоговых систем, рассмотрены структура и функции робототехнических комплексов и гибких автоматизированных производств (ГАП) в различных отраслях промышленности: электронной, машиностроительной, приборостроительной; описаны принципы проектирования, разработки, внедрения и эксплуатации систем; рассмотрены вопросы типизации и унификации технических решений с целью их распространения на другие отрасли промышленности. Также были изложены современные методы проектирования, основанные на моделировании функциональных, информационных и управленческих структур технологического проектирования гибких производственных систем с целью определения структуры программно-технических компонент системы автоматизированного проектирования.

Можно сделать вывод, что сочетания несложных средств обнаружения (оптических энкодеров, датчиков положения) с электрическими приводами механических систем позволило резко расширить сферу их применимости, повысить гибкость работы и сократить количество ручного труда в промышленности.

Основные успехи современных систем управления роботами связаны со значительным прогрессом в области электронных управляющих устройств, программных систем, цифровых видеотехнологий. Машинное зрение – это применение компьютерного зрения для промышленности и производства. В то время как компьютерное зрение – это общий набор методов, позволяющих компьютерам видеть. Областью интереса машинного зрения, как инженерного направления, являются цифровые устройства ввода-вывода и компьютерные сети, предназначенные для контроля производственного оборудования, таких как роботы-манипуляторы или аппараты для извлечения бракованной продукции. Машинное зрение является подразделом инженерии, связанное с вычислительной техникой, оптикой, машиностроением и промышленной автоматизацией. Одним из наиболее распространенных приложений машинного зрения является:

контроль/инспекция промышленных товаров, таких как полупроводниковые чипы, автомобили, продукты питания и лекарственные препараты. Системы машинного зрения для этих целей используют цифровые и интеллектуальные камеры, а также программное обеспечение обрабатывающее изображение для выполнения аналогичных проверок.

Примером использования систем адаптивного управления технологическим манипулятором могут служить разработки компании KUKA, Изначально в них в качестве элементной базы для построения цепей логического управления применялись микропроцессорные комплекты на базе СБИС; для создания корзин широко применялась унификация габаритов и типоразмеров плат, устанавливаемых в корзину отдельного шкафа. Программное обеспечение было жестко привязано к аппаратной реализации системы управления, которая в свою очередь претерпевала со временем изменения эволюционного характера. Для многих версий систем управления роботами KUKA использовались системы числового управления, разработанные фирмой SIEMENS. Так ранние роботы строились с использованием ЧПУ SINUMERIC первого поколения (RCM), а более поздние и совершенные роботы KUKA, 161/60 и KUKA 161/200, строились с использованием ЧПУ SINUMERIC второго поколения RCM2 (RC 20/40) в котором применялся микропроцессор i8086.

Для более точного позиционирования широко использовались двигатели постоянного тока (24 вольта), управляемые отдельно стоящим шкафом приводов. Впоследствии размеры силовых блоков удалось уменьшить, и привода удалось разместить в одном шкафу с системой управления.

Современные системы управления типа KR C4 поставляются с операционной системой Windows XP и являются универсальными для работы со всеми типами роботов KUKA. Периферийные устройства оснащены USB-портами, портом Ethernet и опциональным интерфейсом для Profibus, INTERBUS, DeviceNet и PROFINET. Блок управления включает в себя промышленный компьютер, который общается с системным роботом при помощи MFC карты. Сигналы между манипулятором и системой управления передаются посредством, так называемой, DSE-RDW связи. DSE карта находится в блоке управления, RDW – в базе робота.

Промышленные роботы KUKA нашли широкое применение в различных

производственных областях, в том числе в пищевой промышленности: они используются для обработки пищевых продуктов, погрузки и разгрузки, паллетирования.

Таким образом, очевидно что есть все предпосылки для развития научных основ применения мехатронных автоматизированных систем на основе роботоманипуляторов в пищевой промышленности.

1.2 Исследование кинематики работа-манипулятора

В настоящее время существуют различные подходы к управлению роботоманипулятором. Методы варьируются от классического независимого совместного ПИД-управления до более продвинутых методов, основанных на математических моделях [55, 73, 98, 100]. Используя динамическую модель манипулятора можно повысить производительность с помощью отслеживания положения схвата манипулятора. В работе [74] предлагается алгоритм адаптивного управления манипуляторами, с наложенными на движения ограничениями. Задачу управления манипулятором удобно разбить на две подзадачи – кинематику и динамику. Кинематика изучает движение тел без учета сил или моментов, которые вызывают движение [31]. Кинематика роботов относится к аналитическому исследованию движения робота-манипулятора с выбором для него подходящей кинематической модели. В кинематическом моделировании манипуляторов используются, в основном, два разных пространства: декартово и кватернионное.

Преобразование между двумя декартовыми системами координат можно осуществить путём вращения и смещения [113]. Наиболее распространенным методом описания кинематики робота является предложенный в 1955 году метод Денавита-Хартенберга, использующий четыре параметра.

Денавит и Хартенберг показали, что общая трансформация между двумя суставами требует четырех параметров. Эти параметры, известные как параметры Денавита-Хартенберга (DH), стали стандартом для описания кинематики роботов [31].

Кинематику роботов манипуляторов можно разделить на задачи прямой и обратной (инверсной) кинематики (см. рисунок 1) [31].

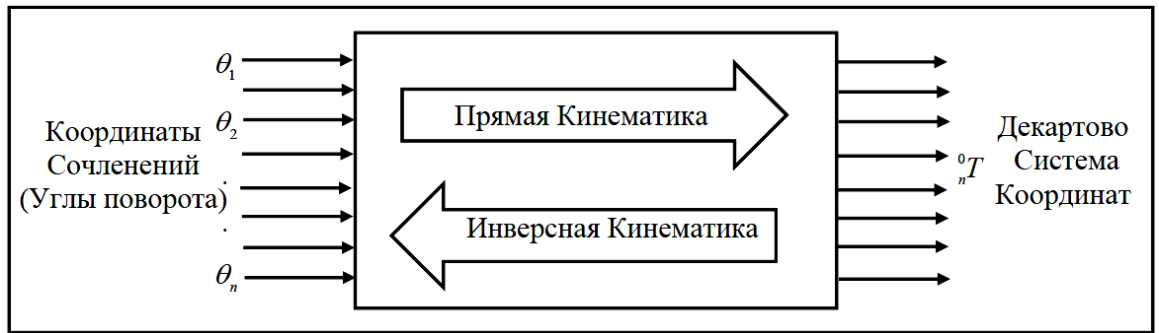


Рисунок 1. Схема прямой и обратной кинематики [31].

Прямая задача кинематики очень проста, зная углы поворота всегда можно получить решение – декартовы координаты манипулятора.

Обратная задача кинематики (инверсная кинематика) – гораздо более сложная задача, чем прямая кинематика. Решение задачи обратной кинематики требует значительных вычислительных ресурсов и обычно занимает слишком долгое время, чтобы можно было в реальном времени управлять манипуляторами [107].

Задача обратной кинематики для последовательного манипулятора изучается на протяжении многих десятилетий, ввиду большой востребованности в управлении манипуляторами.

Кинематический механизм, приводимый в движение серводвигателем, с тем чтобы положение, скорость и ускорение каждого звена механизма, могут быть проанализированы в любой момент времени [54].

На скорости и ускорения движения манипулятора могут быть наложены различные ограничения, причём – различающиеся в различных точках рабочего пространства, кроме того, для большинства моделей роботов характерна нелинейность кинематики.

Оси объединены в системы координат для обеспечения эффективного управления. Тип системы координат определяется кинематическими связями между отдельными осями [40]. Наиболее часто используют следующие системы координат: декартова, цилиндрическая, сферическая, вращающаяся.

Большинство современных роботов-манипуляторов классифицируются как объекты с вращающейся системой координат [37]. Применение такой системы координат, как правило, связано с необходимостью преобразования координат и движений в различных системах координат.

Существует два вида методов решения задачи обратной кинематики: аналитический и численный. Некоторые задачи управления роботом манипулятором приводят к особым точкам и нелинейностям, усложняющим выработку управляющих воздействий. Для очень небольшого класса простых кинетических манипуляторов, например, манипуляторов, координаты которых задаются углами Эйлера, эти задачи управления были решены аналитически [66].

Одним из путей решения задачи обратной кинематики роботоманипуляторов, является способ, в котором уравнения кинематики преобразуют в полином 16 степени (от совместных переменных) [107]. Для манипулятора с n степенями свободы, в любой момент времени, совместная переменная обозначается $\theta_i = \theta(t)$, $i = 1, 2, 3 \dots \dots n$ и переменных, $x_j = x(t)$, $j = 1, 2, 3 \dots \dots m$. Отношения между эффекторами позиции $x(t)$ и угла $\theta(t)$ могут быть представлены явными прямыми кинематическими уравнениями

$$X(t) = f(\theta(t)) \quad (1)$$

где f – это нелинейная непрерывная и дифференцируемая функция.

С другой стороны, задача обратной кинематики, которая может быть выражена в виде:

$$\theta(t) = f'(x(t)) \quad (2)$$

имеет не единственное решение, вследствие нелинейной, неопределенной и различной природы управляющих уравнений [61].

В работе [19] построена модель комбинированного позиционно-силового управления для системы “робот – инструмент”, для случая, когда инструмент оснащен поступательным приводом.

В целом, разнообразие роботов, классифицированных по кинематическим решениям, было отражено в монографии [4].

В ряде случаев, при моделировании и расчете обратной кинематики, может быть полезна концепция мягких вычислений, особенно в тех случаях, когда задача решается многократно, например, для адаптивного управления роботом в режиме реального времени [20], [45], [47]. Если число степеней свободы возрастает, то применять традиционные методы управления, становится все более сложно и особенно трудно решить задачу обратной кинематики [118]. Мягкие вычисления

используются, чтобы найти решение обратной задачи кинематики. Они с успехом подходят для адаптивного управления роботами–манипуляторами, в режиме реального времени, с допустимой ошибкой управления [88].

В последние годы для решения задачи обратной кинематики начинают использоваться искусственные нейронные сети ([46], [90] и [48]), а также адаптивные системы на основе нечетких искусственных нейронных сетей [50].

1.3 Исследование динамики робота-манипулятора

Роботы-манипуляторы начали активно разрабатываться с 1950-х годов. Манипулятор представляет собой механический рычаг, выполняющий функции движения аналогично руки человека, и играет важную роль в устранении операционных рисков в области промышленного производства [21, 63, 43, 120].

Робот-манипулятор состоит из последовательно соединённых звеньев цепи (суставов), соединённых вращательными или поступательными сочленениями. Соотношение между движением сочленений и силами этих связей и соединений определяются кинематикой и динамикой. Из-за того, что они описываются сложными нелинейными дифференциальными уравнениями, часто используются такие методы решения как нейронные сети [94, 35, 85].

Нейронные сети моделей роботизированных систем с успехом использованы в различных конкретных вариантах движения для конфигурации или определения движущихся частей. Например, нейронная сеть была использована для контроля движения перевернутого маятника с неизвестными динамическими параметрами [43, 120], для отслеживания движения и поиска динамического равновесия в режиме реального времени с помощью нейронной модели [93]. Экспериментальные работы показали низкие значения погрешности в двумерной задаче трёхзвенного робота-манипулятора [35].

Существует двусторонняя связь для каждого соединения двигателей, где сенсорная информация о положении и скорости подается обратно на блок управления; результаты отправляются на моторы (сервоприводы). Существует ряд способов для позиционирования и ориентации рабочего органа манипулятора [49].

Для изучения динамического поведения конструкций часто используется метод конечных элементов (FEM), который может быть применён и для

теоретического изучения динамических характеристик KUKA Robot [93]. Трёхмерное моделирование робота было сделано с помощью системы автоматизированного проектирования (САПР) и анализ проводили с использованием ANSYS FEM. Есть и другие работы на основе такого же подхода [74].

Разнообразие роботов, классифицированных по динамическому решению, было отражено в работе [6]

1.4 Управление роботом-манипулятором

Управление роботом манипуляторов, отличается от других промышленных объектов. Это связано с большим числом отдельно управляемых механических осей. Стоит отметить, что из-за особенности конструкции и расположение элементов робот-манипулятор, существуют кинематических и динамических отношений между осями; они должны быть приняты во внимание для достижения требуемого качества процессов управления [64].

Из-за высокой вычислительной эффективности и высокой возможности адаптации широко применяются нечёткие методы, особенно для оптимальных и адаптивных систем [20].

Для управления манипуляционными системами необходимо уметь решать ряд задач управления, таких как: анализ кинематики робота и рабочего пространства; планирование движения; предварительный расчет сил и моментов; анализ динамической точности и идентификация кинематических и динамических параметров робота.

В работе Kabuka M. [51] использованы два высокопроизводительных сигнальных процессора для вычислений с плавающей точкой и набор специализированных контроллеров для построения системы управления для роботом из шести совместных манипуляторов. Yasuda, G. [121] на основе ПК ЭВМ и микроЭВМ PIC создал распределенные контроллеры движения для мобильных роботов. Li T.C. [75] использовали для ПЛИС для реализации автономного нечёткого поведение управления мобильного робота. Oh S.N. [88] представил пример совместного использования технологий DSP и FPGA для разработки общих аппаратных систем контроля движения двуногих роботов.

Kung Y.S. [67] использовал программное и аппаратное обеспечения для контроля движения сочлененного манипулятора.

В работах [101, 58] были представлены некоторые приемы анализа систем управления движением роботов, как обычной системой автоматизированного управления на основе точной математической модели, что дает положительные результаты в плане отслеживания ошибок и надежности, но создаёт трудности разработки эффективного алгоритма из-за неопределенности в модели, вызванной неточной оценкой параметров модели.

В работе [104], предложено использовать ПИД-контроллер на базе внутренней модели управления (ИМС) для управления двухзвенным SCARA роботом. ПИД-контроллер может быть создан путем применения серии Maclaurin расширения контроллеров ИМС в общей обратной связи контуром с использованием фильтра высоких частот. Моделирование результатов показывает что предложенный метод управления угловой позиции SCARA робот на основе ПИД-контроллера позволяет избавиться от статической ошибки.

В работе Jiang и Ishida [105] предлагается динамическое отслеживание траектории управления манипулятором с помощью совместного использования ПИД контроллера и нейросетевого контроллера (трёхслойного).

Для адаптивного управление роботом типа SCARA можно использовать технологию искусственных нейронных сетей [106]. Выходные сигналы искусственной нейронной сети регулировки подбираются таким образом, чтобы избежать нежелательных состояний системы. В результате, ошибка перемещения между роботом и заданным эталонным сигналом асимптотически сходится к нулю. Производительность системы была продемонстрирована в симуляции.

В работе [109] исследовано нейро-адаптивное управления DTSMNAC для роботов манипуляторов в режиме скольжения.

В [57] работе была рассмотрена для робота манипулятора SCARA RP41 проблема проектирования надежной переменной структуры управления в режиме скольжения плоскости. Результаты моделирования свидетельствуют о надежности работы переменной структурой управления, но применение скользящих режимов в условиях переменной массы перевозимого груза, изменений параметров, внешних возмущений сигналов может приводить к неточностям.

Разнообразные роботы, классифицированные по управлению движением, нашли отражение в монографической и учебной литературе [5].

Для управления движением использовался программный комплекс, предназначенный для автоматизации манипулятора робота [14].

В работе [27] показано с помощью симуляции, что DDR робот типа SCARA может успешно управляется простой системой адаптивного управления с двумя степенями свободы. Система управления основана на линейной модели, что делает ее осуществление является относительно простым. Совместный угол отслеживает ориентировочный маршрут, а влияние входной помехи может быть подавлено.

В работе [22] проведено всестороннее моделирование и идентификация промышленного SCARA робот включения сервоприводом в динамике.

Внедрение автоматизированной системы адаптации, которая была бы гибкой и достаточной для автоматической адаптации, похоже на удовлетворение требований к качеству. Использование существующих традиционных методов может быть ограничивающим фактором, когда новые продукты вводятся в существующие системы сборки [76, 41]. С другой стороны, многие платформы, например KUKA Robot Language (KRL) допускают использование робота KUKA для обнаружения и перемещения предметов без предварительного программирования, что позволяет модифицировать технологический процесс в реальном времени [102, 86].

1.5 Исследование и управление компьютерного и машинного зрения

Использование современных систем компьютерного зрения с улучшенными системами распознавания используются для уточнения координат объекта или робота. Достижения в области 3D машинного зрения сделали возможным реакцию роботов на изменяющиеся условия среды и адаптацию к ней, что позволило применять роботов для работ, где нет жёсткого соответствия реальности проекту, что было очень трудно для роботов в прошлом. Роботы теперь могут брать объекты разных форм и ориентаций с конвейера [30].

Системы компьютерного и машинного зрения, несомненно, позволяют как повысить гибкость систем управления роботами, так и повысить безопасность работы. Многие роботы оснащены системами зрения с 360-градусным обзором, что

часто используется в промышленной сборке, для выбора заданной детали из подборочного лотка, как и других сложных задач [28].

Система компьютерного зрения предназначена для выполнения следующих операций: получение изображений (машинное зрение) и анализ, идентификация объектов [20]. Множество видов промышленной деятельности получили применение машинное зрение и компьютерное зрение в производственных процессах. Это, среди прочего: производство электроники [111], качественной текстильной продукции [25], финишная обработка металлических изделий [115], производство стекла [87], производство интегральных схемы [77] и многое другое. Системы машинного зрения повышают производительность и качество управления и обеспечивают конкурентные преимущества в отраслях, использующих эту технологию.

Каждый пиксель имеет цвет. Среди многих схем для представления цвета, наиболее распространена RGB-система, в которой каждая цветовая компонента может варьироваться от 0 по 255. Значение 255 представляет максимальное насыщение данного цветового компонента, в то время как значение 0 представляет собой полное отсутствие этого компонента.

В таблице 1 приведены некоторые примеры цветов и их значений RGB.

Цвет RGB	Значение
Черный	(0, 0, 0)
Красный	(255, 0, 0)
Зеленый	(0, 255, 0)
Голубой	(0, 0, 255),
Желтый	(255, 255, 0)
Серый	(127, 127, 127)
Белый	(255, 255, 255)

Таблица 1. Примеры цветов и их значения RGB [56].

В цветовой системе RGB всего возможно $256 \cdot 256 \cdot 256 = 16\,777\,216$ различных значения цветов. RGB-система называется true color system [116].

Цифровые изображения состоят из пикселей. Цветное изображение может быть представлено как сочетание 3 цветных каналов, например, изображение со

стандартной цифровой фотокамеры будет красного, зеленого и синего каналов, как показано Рисунок 2 [108]. Серое (grayscale) изображение имеет только один канал.

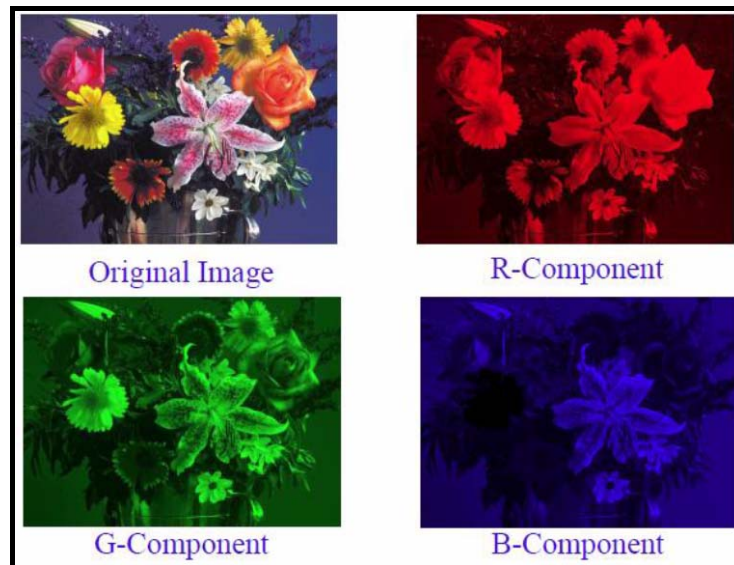


Рисунок 2. Оригинальный образ содержит три компонента: красный, зеленый и синий [108].

Выводы по главе 1

1. Проведён обзор научно-технической литературы, обнаружено, что единого общепринятого метода выбора оптимальной траектории движения роботоманипуляторов не существует.
2. Не существует методов расчёта, которые бы обеспечивали производительность системы управления за счет снижения вычислительной сложности обработки.
3. Гибкость перепрограммирования и простота работы с управлением движения манипуляторов путем выбора оптимальной траектории не определены.
4. Нет математических моделей, которые можно использовать для кинематических и динамических исследований без использования матриц преобразования для каждого подвижного соединения.

ГЛАВА 2. Кинематика работа манипулятора

2.1 Кинематика работа манипулятора

Кинематика изучает движение тел без учета сил и моментов, которые вызывают движение. Кинематикой работа называется аналитическое исследование движения робота-манипулятора [31]. Разработка подходящих моделей кинематики для механизмов и роботов имеет исключительно важное значение для анализа движения промышленных манипуляторов. В кинематике используют различные системы координат, при этом преобразование между двумя декартовой системы координат всегда можно разложить на вращение и перенос [70].

Известны различные способы решения обратной задачи кинематики: с использованием метода Ньютона-Рафсона [23, 117] для нелинейного уравнения кинематики и алгоритмы типа предиктор-корректор [106, 23] для дифференциальных кинематических уравнений. Основным недостатком первого подхода являются вычислительные сложности (требуется точное задание вектора начальных координат, в некоторых случаях метод не сходится к решению). Второй подход преобразует обратную кинематическую задачу в эквивалентную оптимизационную задачу [42, 44], решаемую с помощью различных алгоритмов с использованием градиента. Кроме того, для решения обратной кинематики разработаны и другие методы, в частности на эвристические, такие как использование нейронных сетей [60, 52], генетические алгоритмы [82, 53]. Однако, их применение в реальном времени затруднено, из-за малого числа итераций, которые успевает вычислить система, что приводит к снижению точности решения.

2.2 Программное обеспечение прямой и обратной кинематики вращательного движения робота-манипулятора с тремя степенями свободы

Робот-манипулятор состоит из последовательной цепи жестких суставов, соединённых друг с другом посредством вращательных или линейных сочленений. Совместное расположение каждого сустава робота обычно определяется по отношению к соседним. Они связаны последовательными соединениями, которые могут быть описаны 4×4 однородными матрицами, определяющей ориентацию и положение суставов роботов. Соответствующие совместные значения должны быть рассчитаны на большой скорости путем решения обратной задачи кинематики [97].

Существует два подхода к решению прямой и обратной задач кинематики: геометрические и алгебраические методы. В данном исследовании вместо традиционных методов предложен новый, разработанный путем математического моделирования вращательных движений 3-DOF робота-манипулятора (RRR) (геометрический подход), определены все параметры конструкции, а также их отношения, получены математические уравнения с геометрическими представлениями, осуществлено преобразование этих уравнений в LabVIEW для генерирования кодов программирования, а затем разработан интерфейс для передачи результатов в САД программу, в частности – SolidWorks [15].

Введём обозначения программы для кинематического анализа:

Суставные углы – входные переменные вращательного шарнира, передающего вращение под углом (ϕ, θ, ψ).

Робот-манипулятор – размеры манипулятора (d, El и Wr).

Выход (3-D, End-Effector с координатами) – декартовы координаты конечного эффектора (x, y и z).

Интерфейс программы прямой кинематики, включающий в себя входные параметры робота-манипулятора, представлен на рисунке 3.

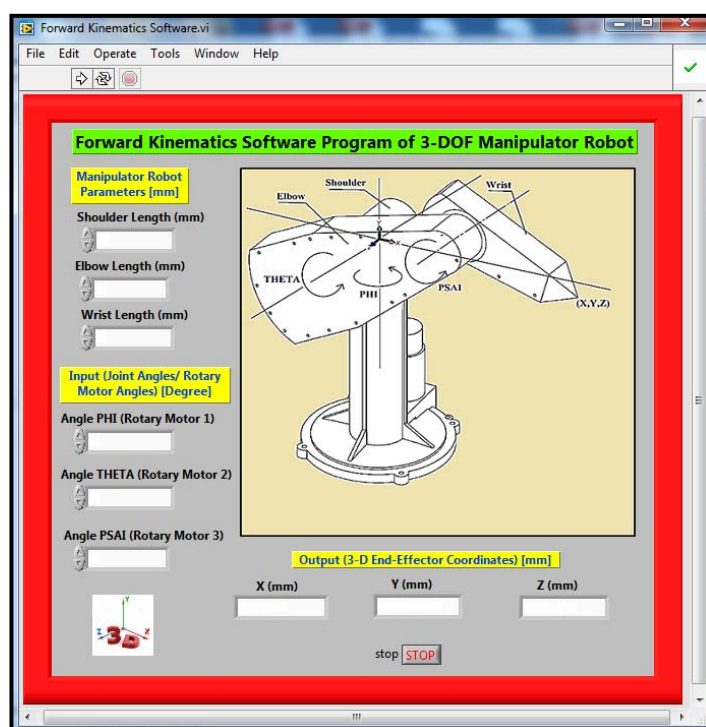


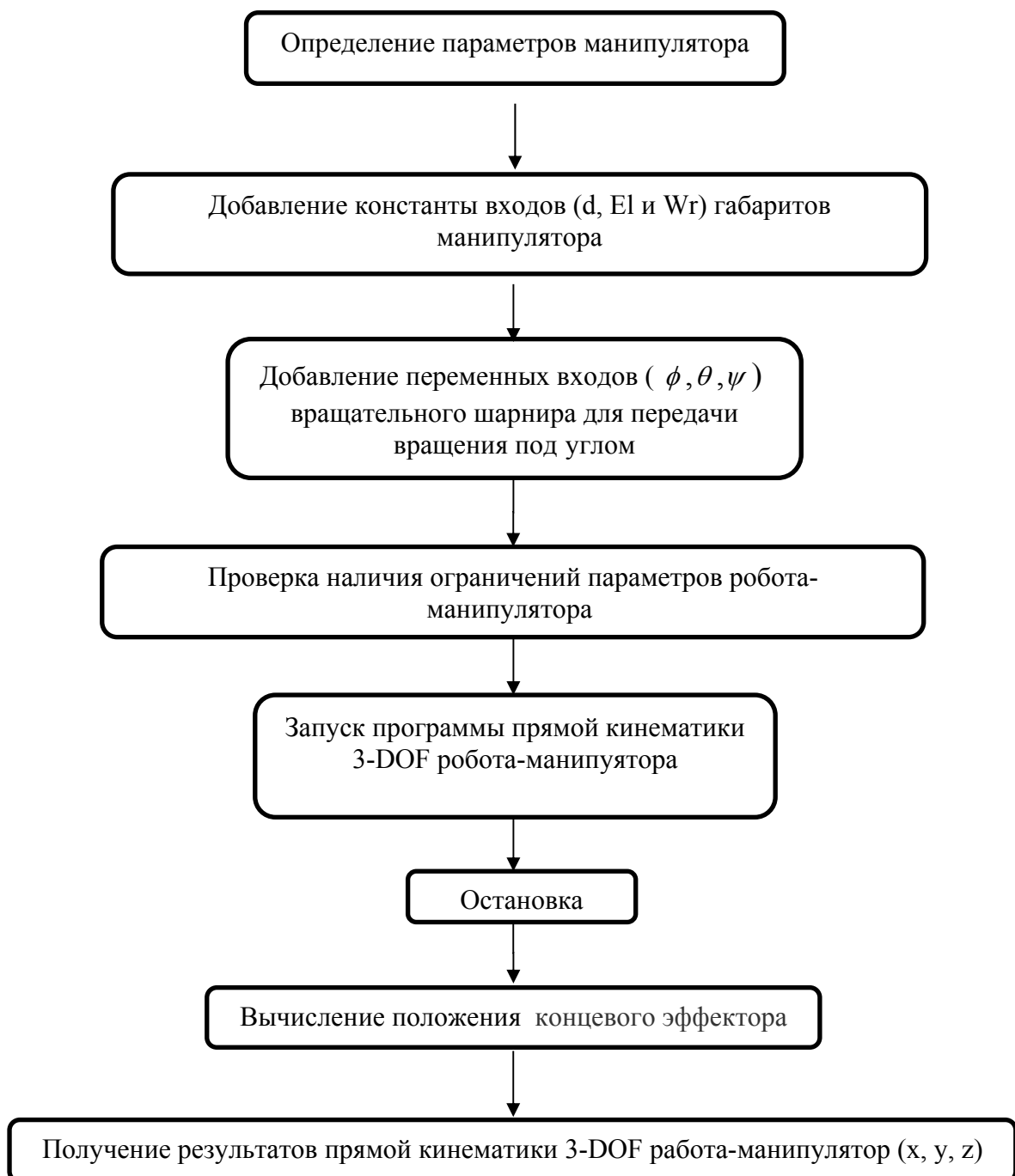
Рисунок 3. Прямая кинематика 3-DOF манипулятора робота [79].

Входные параметры разделены на две части:

- а- Фиксированные параметры: размеры плеча, локтя и запястья манипулятора (длины в мм), эти параметры могут варьироваться от одного робота к другому в зависимости от его конструкции.
- б- Переменные параметры: Суставные углы (ϕ, θ, ψ).

Выходные параметры: координаты инструмента в трехмерном пространстве X, Y и Z (в мм).

В алгоритме, представленном в блок-схеме 1, поэтапно описывается организация процедур обработки данных.



Блок-схема 1. Алгоритм прямой кинематики 3-DOF робота-манипулятора [79].

Части программы обратной кинематики можно представить следующим образом:

Вход (3-D, End-Effector координаты): включает в себя декартовы координаты в пространстве (x, y и z).

Параметры робота-манипулятора: включают в себя ввод таких данных, как размеры манипулятора (d, El и Wr).

Выход (Суставные углы): включает в себя входные переменные вращательного шарнира для передачи вращения под углом (ϕ, θ, ψ).

На Рисунке 4 представлен интерфейс программного обеспечения обратной кинематики, которое включает в себя входные параметры робота-манипулятора.

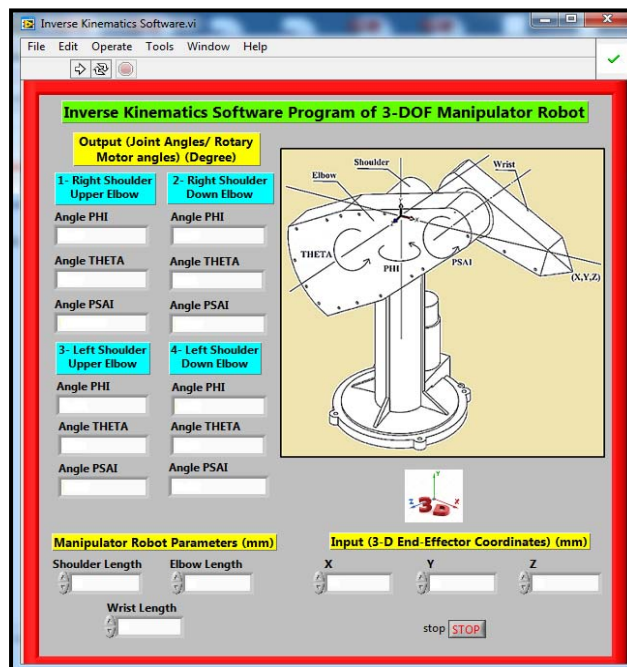


Рисунок 4. Интерфейс программы обратной кинематики 3-DOF робота-манипулятора.

Входные параметры разделены на две части:

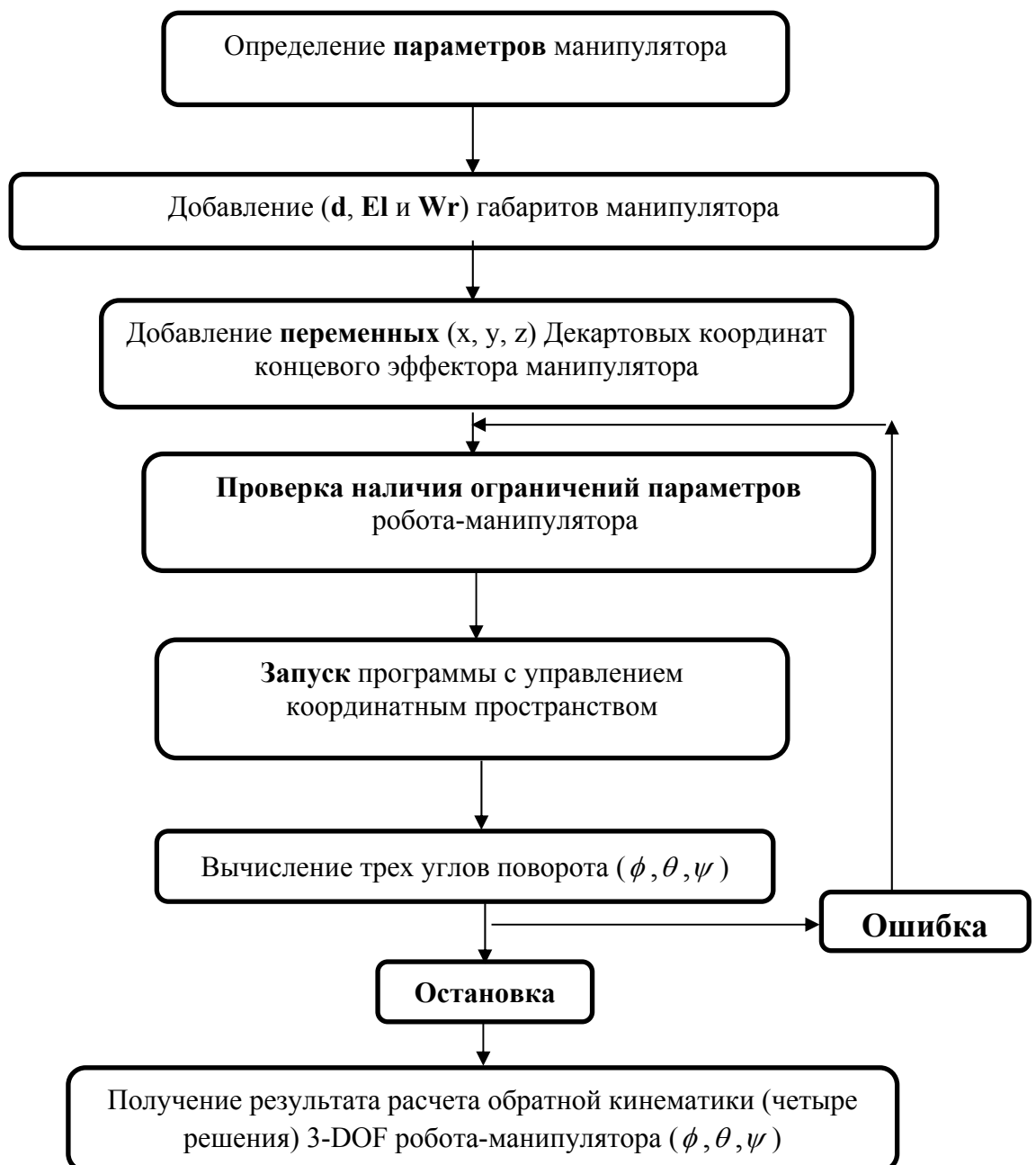
- а- Постоянные параметры: размеры плеча, локтя и запястья манипулятора (длина в мм), эти параметры могут меняться от одного робота к другому в зависимости от его конструкции.
- б- Переменные параметры: координаты конечного эффектора в трех измерениях X, Y и Z (в мм), эти параметры должны быть расположены в рабочей зоне робота-манипулятора.

Выходные параметры разделены на четыре части:

- а- Суставные углы (углы поворотного двигателя) (в градусах) правого плеча - верхнего локтя.

- b- Суставные углы (углы поворотного двигателя) (в градусах) правого плеча - нижнего локтя.
- c- Суставные углы (углы поворотного двигателя) (в градусах) левого плеча - верхнего локтя.
- d- углы соединения (углы поворотного двигателя) (в градусах): левого плеча – нижнего локтя.

Этапы программирования можно изложить в следующем алгоритме, представленном в блок-схеме 2, описывающей организацию процедур обработки данных.



Блок-схема 2. Алгоритм обратной кинематики 3-DOF робота-манипулятора.

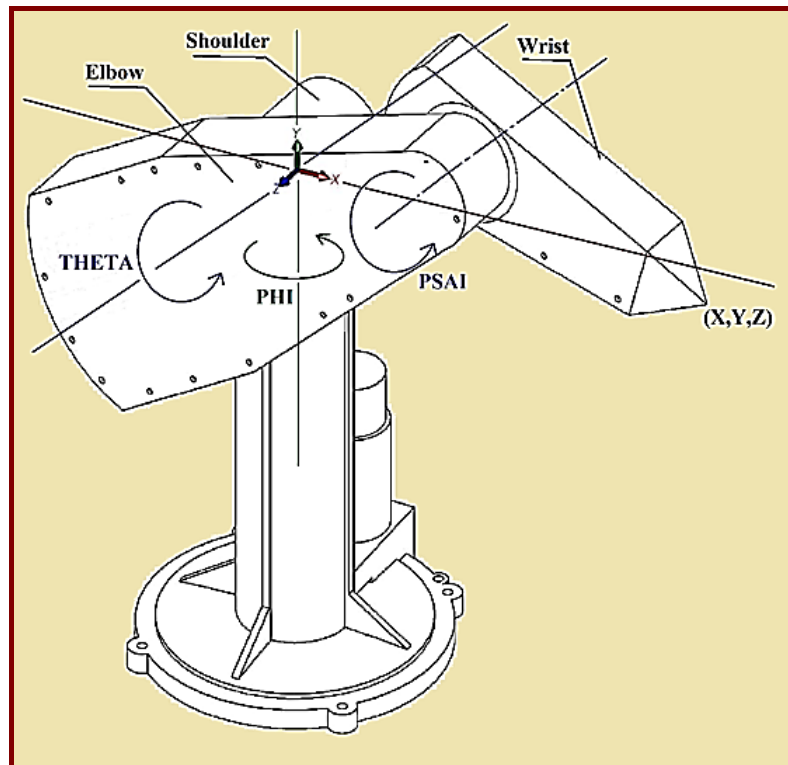


Рисунок 5. 3-DOF робот-манипулятор.

На Рисунке 5 показан 3-DOF робот-манипулятор [13] с тремя вращательными степенями свободы.

1- Параметры ограничения прямой и обратной кинематики робота-манипулятора:

1- $d > 0$

2- $El > 0$

3- $Wr > 0$

4- $El > Wr$

2- Физические ограничение робота-манипулятора (обратная кинематика):

1- $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \geq \sqrt{d^2 + (El - Wr)^2}$

2- $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \leq \sqrt{d^2 + (El + Wr)^2}$

3- $L_1 \leq d$

A- Рабочее пространство 3-DOF манипулятора

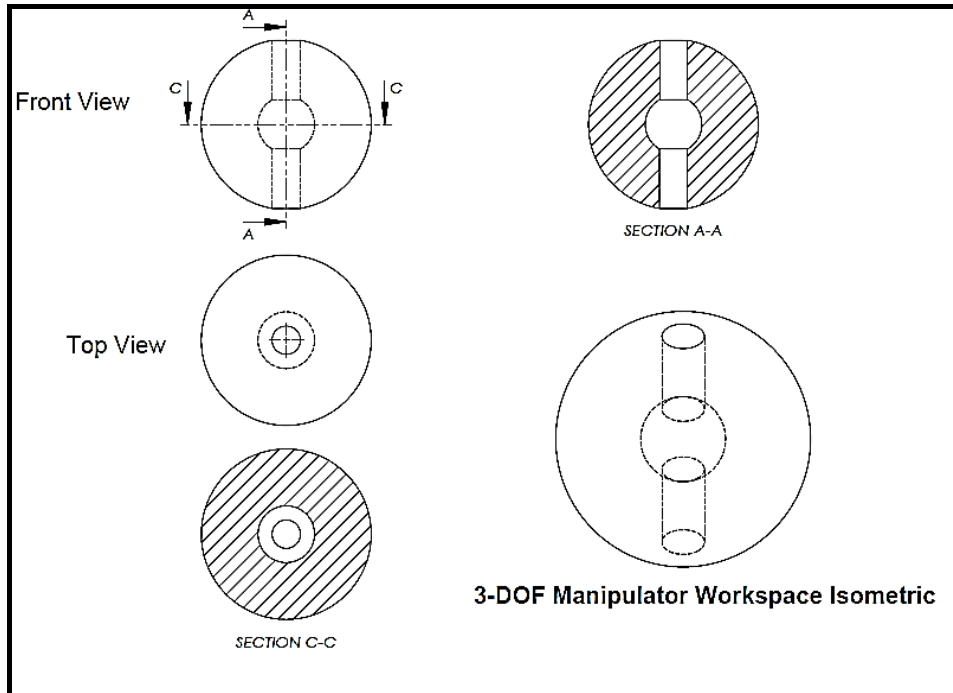


Рисунок 6. Вид рабочей зоны 3-DOF (RRR) робота-манипулятора

При выполнении задач манипулятор должен дотянуться до заготовок или приспособлений. Они должны быть установлены в соответствии с рабочим пространством манипулятора [31]. Рабочая зона изображена на Рисунке 6.

Какие существуют ограничения для 3-DOF робота-манипулятора?

Доступная рабочая зона представляет собой полушарие, в котором:

1- максимальный наружный диаметр:

$$2\sqrt{d^2 + (El + Wr)^2} ;$$

2- минимальный внутренний диаметр:

$$2\sqrt{d^2 + (El - Wr)^2} ;$$

3- диаметр вертикального полого цилиндра в полушарии:

$$2d .$$

Запишем совокупность уравнений математической модели прямой кинематики (FK)

$$E = El \times \cos(\theta)$$

$$F = Wr \times \cos[180 - (\theta + \psi)]$$

$$H = El \times \sin(\theta)$$

$$G = Wr \times \cos[(\theta + \psi) - 90]$$

$$L_2 = E + F$$

$$y = H - G$$

$$A = d \times \cos(\phi)$$

$$D = L_2 \times \cos(\phi)$$

$$C = d \times \sin(\phi)$$

$$B = L_2 \times \sin(\phi)$$

$$z = A - B$$

$$x = C + D$$

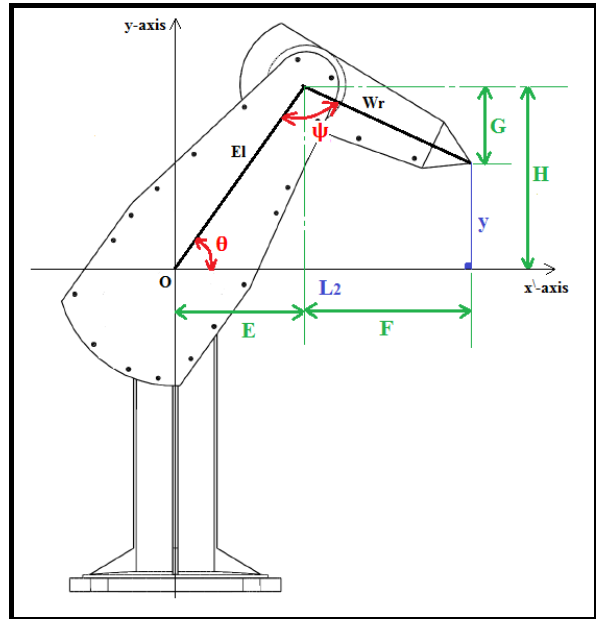


Рисунок 7. Вид спереди

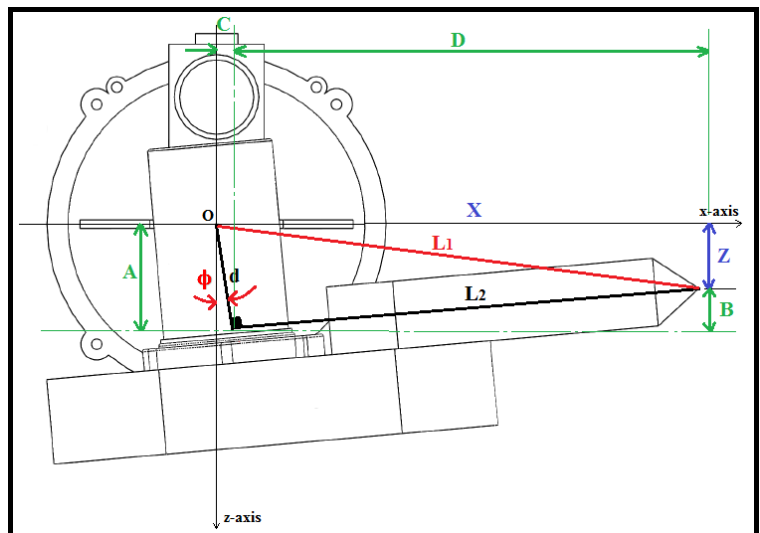


Рисунок 8. Вид сверху

Исследование прямой кинематики и его результаты

В этом исследовании мы использовали 3-DOF робота манипулятора с параметрами согласно таблице 2:

Таблица 2. Параметры 3-DOF робота манипулятора (RRR).

Габариты манипулятора (в мм)	ϕ (Град.)	θ (Град.)	ψ (Град.)
Плечо = 127	-18.3837	54.3942	100.174
Колено = 431.8	161.616	305.606	259.826
Браслет = 351.79	316.456	125.606	-100.174
	136.456	234.394	100.174

Результаты работы программы прямой кинематики приведены таблице 3:

Таблица 3. Вывод результатов моделирования 3-DOF манипулятор робота (RRR).

Совместные углы (град.)	X (мм)	Y (мм)	Z (мм)
$\phi = -18.3837$	500	200	300
$\theta = 54.3942$			
$\psi = 100.174$			
$\phi = 161.616$	-500	-200	-300
$\theta = 305.606$			
$\psi = 259.826$			
$\phi = 161.616$	-500	200	-300
$\theta = 344.332$			
$\psi = 259.826$			
$\phi = 136.456$	500	-200	300
$\theta = 164.332$			
$\psi = -100.174$			

В этой программе можно выбрать произвольные значения совместных углов для выбранного манипулятора робота и получить координаты конечного инструмента (X, Y и Z), кроме того, мы можем изменить размеры суставов манипулятора, см. Рисунок 9.

Следующий показывает интерфейс для этого с помощью входных параметров и выходных результатов.

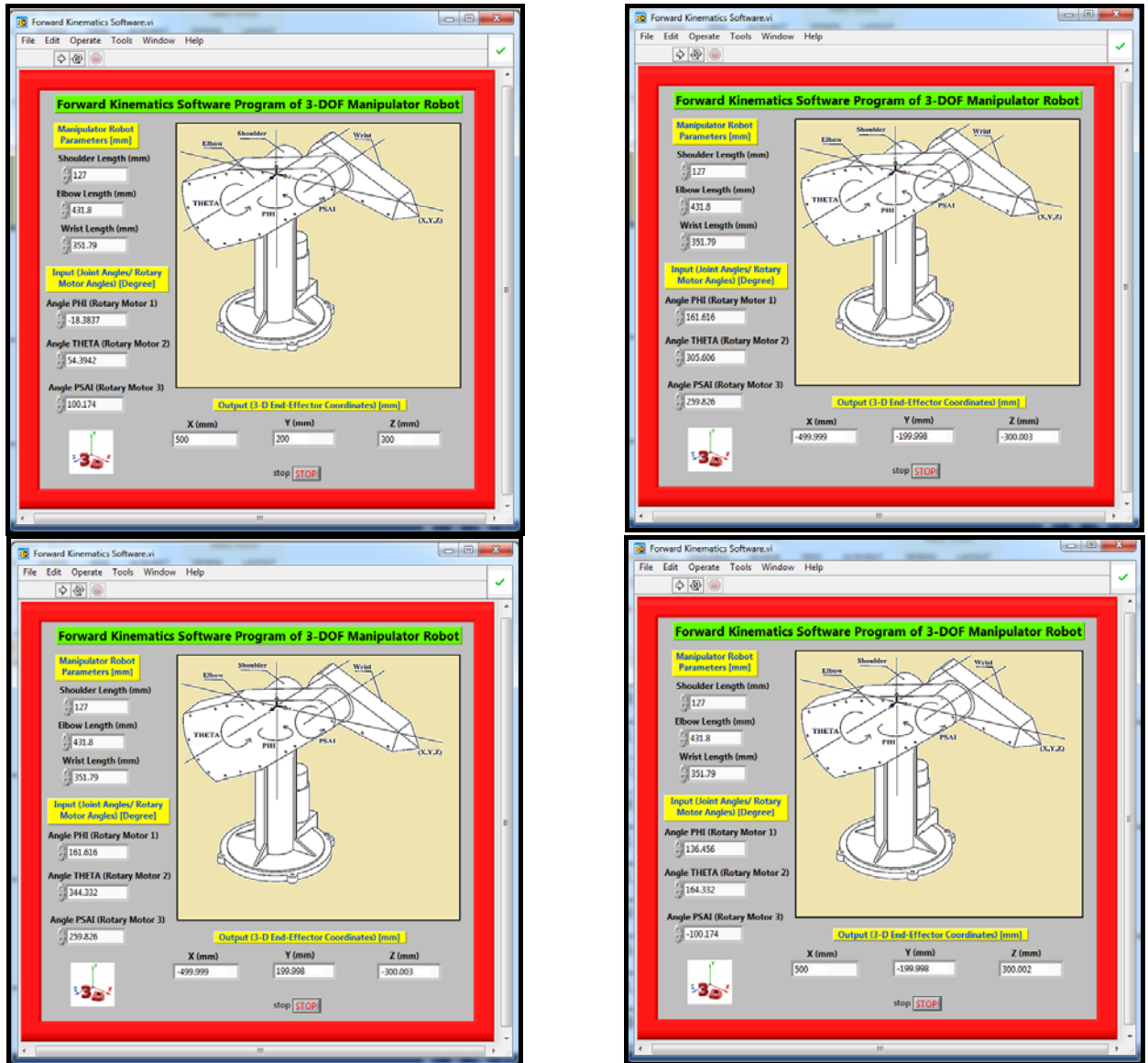


Рисунок 9. Пример интерфейса программы прямой кинематики

Возможные решения для обратной кинематики 3-DOF робота-манипулятора

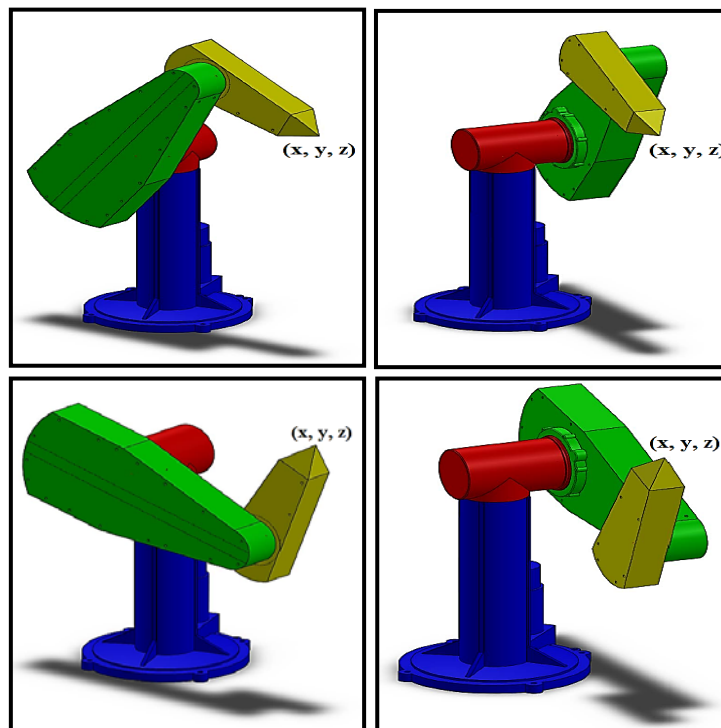


Рисунок 10. Четыре возможных решения 3-DOF робота-манипулятора:

1. Правое плечо – верхний локоть. 3. Левое плечо – верхний локоть.
2. Правое плечо – нижний локоть. 4. Левое плечо – нижний локоть.

Существуют четыре возможных решения, чтобы достичь инструментом манипулятора точки (x, y, z) , если этот момент был расположен внутри рабочей зоны манипулятора (в пределах полушария), как показано на Рисунок 10.

Существует два возможных решения для достижения инструментом манипулятора точки назначения (x, y, z) , если эта точка находится на внутренней или внешней границе рабочей зоны манипулятора.

Невозможно найти решение задачи обратной кинематики, если точка (x, y, z) расположена за пределами рабочей зоны манипулятора.

Схема разработанного геометрического подхода решения задачи обратной кинематики (ИК):

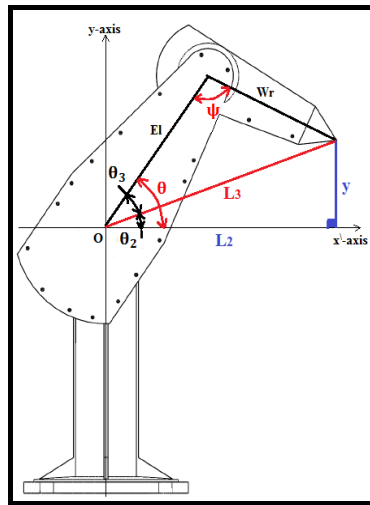


Рисунок 11. 3-DOF манипулятор робота (RRR), вид спереди

$$L_1 = \sqrt{x^2 + z^2}, \quad L_2 = \sqrt{L_1^2 + d^2}, \quad \phi_2 = \tan^{-1}\left(\frac{z}{x}\right), \quad \phi_3 = \tan^{-1}\left(\frac{L_2}{d}\right), \quad L_3 = \sqrt{L_2^2 + y^2}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{y}{L_2}\right), \quad \theta_3 = \cos^{-1}\left(\frac{L_3^2 + El^2 - Wr^2}{2 \times L_3 \times El}\right)$$

1- первая позиция: Правое плечо – верхний локоть (RS-UE)

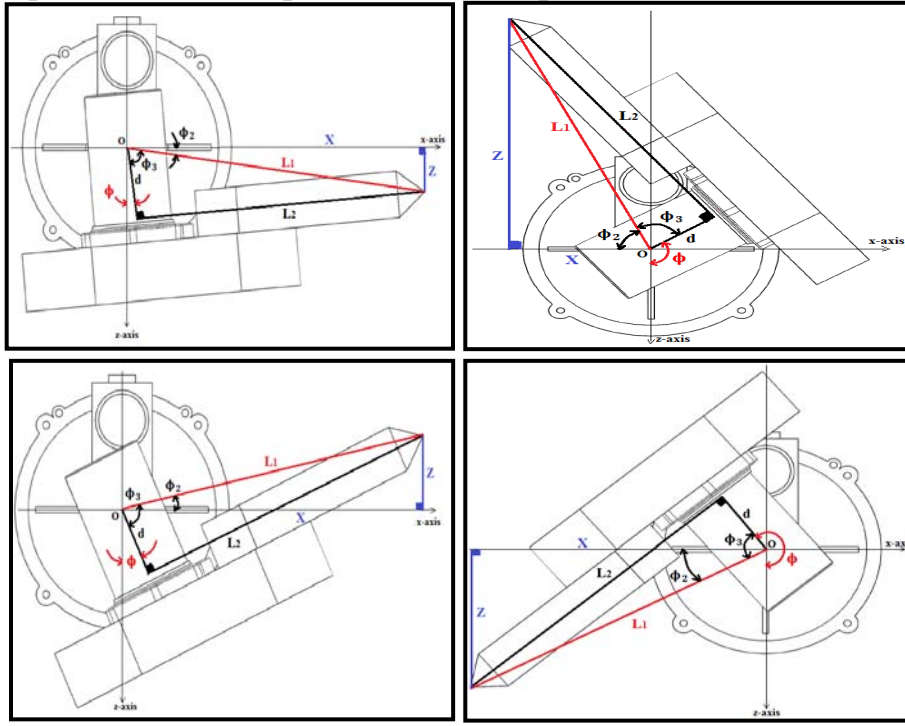


Рисунок 12. Вид сверху. Правое плечо - (движение вверх/вниз) локоть 3-DOF робота-манипулятора (RRR).

$$\theta = \theta_2 - \theta_3, \quad \psi = \cos^{-1} \left(\frac{Wr^2 + El^2 - L_3^2}{2 \times Wr \times El} \right)$$

1- в случае, если $(x > 0)$ и $(z \geq 0)$, а затем:

$$\phi = 90 - (\phi_2 + \phi_3)$$

2- Если $(x \geq 0)$ и $(z < 0)$, а затем:

$$\phi_2 = \cos^{-1} \left(\frac{x}{L_1} \right), \quad \phi_3 = \cos^{-1} \left(\frac{d}{L_1} \right), \quad \phi = 90 - (\phi_3 - \phi_2)$$

3- Если $(x < 0)$ и $(z \leq 0)$, а затем:

$$\phi = 270 - (\phi_2 + \phi_3)$$

4- в случае, если $(x \leq 0)$ и $(z > 0)$, а затем:

$$\phi_2 = \sin^{-1} \left(\frac{z}{L_1} \right), \quad \phi_3 = \sin^{-1} \left(\frac{L_2}{L_1} \right), \quad \phi = 270 - (\phi_3 - \phi_2)$$

2 - Вторая позиция: Правое плечо – нижний локоть (RS-DE)

$$\theta = 360 + (\theta_2 - \theta_3)$$

$$\psi = 360 - \cos^{-1} \left(\frac{Wr^2 + El^2 - L_3^2}{2 \times Wr \times El} \right)$$

1- в случае, если $(x > 0)$ и $(z \geq 0)$, а затем:

$$\phi = 90 - (\phi_2 + \phi_3)$$

2- Когда $(x \geq 0)$ и $(z < 0)$, а затем:

$$\phi_2 = \cos^{-1}\left(\frac{x}{L_1}\right), \quad \phi_3 = \cos^{-1}\left(\frac{d}{L_1}\right)$$

$$\phi = 90 - (\phi_3 - \phi_2)$$

3- Если $(x < 0)$ и $(z \leq 0)$, а затем:

$$\phi = 270 - (\phi_2 + \phi_3)$$

4- в случае, если $(x \leq 0)$ и $(z > 0)$, а

затем:

$$\phi_2 = \sin^{-1}\left(\frac{z}{L_1}\right), \quad \phi_3 = \sin^{-1}\left(\frac{L_2}{L_1}\right),$$

$$\phi = 270 - (\phi_3 - \phi_2)$$

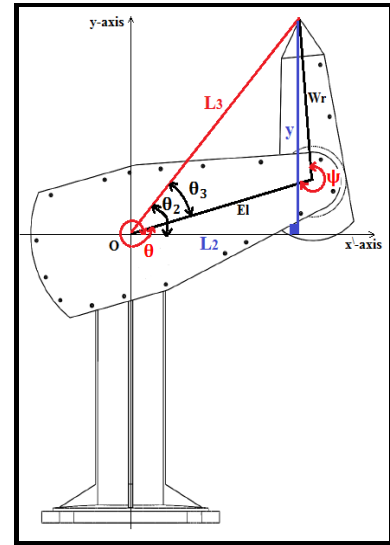


Рисунок 13. Вид спереди правого плеча – нижнего локтя на 3-DOF роботеманипуляторе (RRR).

3 - третья позиция: Левое плечо – верхний локоть. (LS-UE)

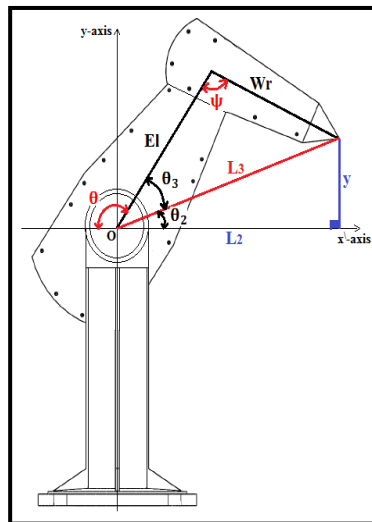


Рисунок 14. Передний вид левого плеча - верхнего локтя 3-DOF роботеманипулятора (RRR).

$$\theta = 180 - (\theta_2 + \theta_3), \quad \psi = -\cos^{-1}\left(\frac{Wr^2 + El^2 - L_3^2}{2 \times Wr \times El}\right)$$

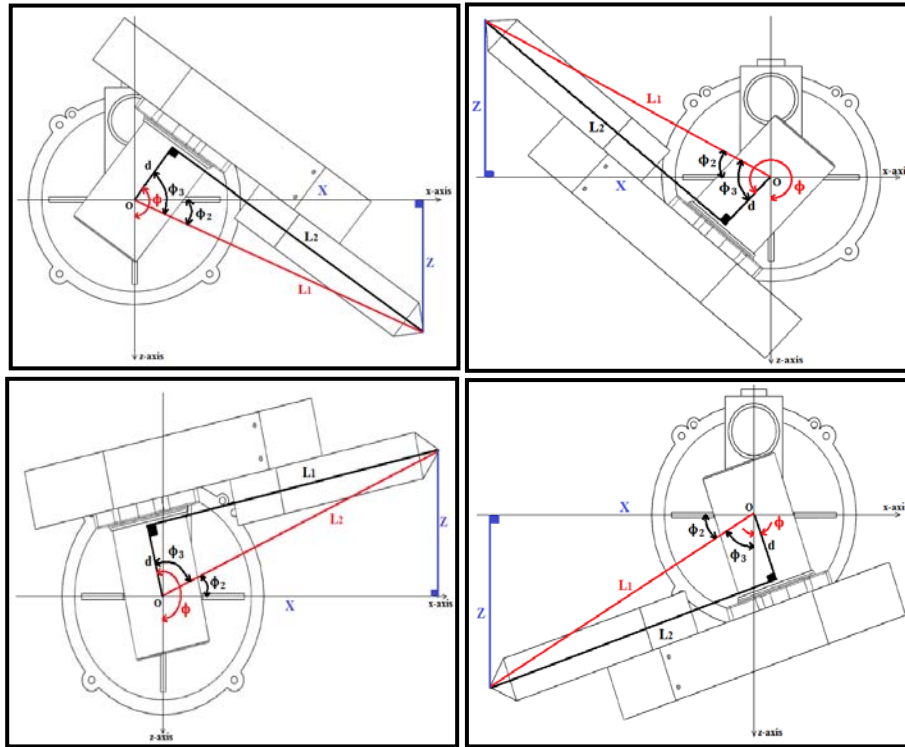


Рисунок 15. Вид сверху. Левое плечо - (движение вверх/ вниз) локтя для 3-DOF робота-манипулятора (RRR).

1- в случае, если $(x > 0)$ и $(z \geq 0)$, а затем:

$$\phi = 90 - (\phi_2 - \phi_3)$$

2- Если $(x \geq 0)$ и $(z < 0)$, а затем:

$$\phi_2 = \cos^{-1}\left(\frac{x}{L_1}\right), \quad \phi_3 = \cos^{-1}\left(\frac{d}{L_1}\right), \quad \phi = 90 + (\phi_2 + \phi_3)$$

3- Если $(x < 0)$ и $(z \leq 0)$, а затем:

$$\phi = 270 + (\phi_3 - \phi_2)$$

4- в случае, если $(x \leq 0)$ и $(z > 0)$, а затем:

$$\phi_2 = \sin^{-1}\left(\frac{z}{L_1}\right), \quad \phi_3 = \sin^{-1}\left(\frac{L_2}{L_1}\right), \quad \phi = -90 + (\phi_2 + \phi_3)$$

4- четвертая позиция: Левое плечо – нижний локоть. (LS-DE)

$$\theta = 180 - (\theta_2 - \theta_3)$$

$$\psi = \cos^{-1}\left(\frac{Wr^2 + El^2 - L_3^2}{2 \times Wr \times El}\right)$$

1- в случае, если $(x > 0)$ и $(z \geq 0)$, а затем:

$$\phi = 90 - (\phi_2 - \phi_3)$$

2- Если $(x \geq 0)$ и $(z < 0)$, а затем:

$$\phi_2 = \cos^{-1}\left(\frac{x}{L_1}\right), \quad \phi_3 = \cos^{-1}\left(\frac{d}{L_1}\right)$$

$$\phi = 90 + (\phi_2 + \phi_3)$$

3- Если $(x < 0)$ и $(z \leq 0)$, а затем:

$$\phi = 270 + (\phi_3 - \phi_2)$$

4- в случае, если $(x \leq 0)$ и $(z > 0)$, а затем:

$$\phi_2 = \sin^{-1}\left(\frac{z}{L_1}\right), \quad \phi_3 = \sin^{-1}\left(\frac{L_2}{L_1}\right), \quad \phi = -90 + (\phi_2 + \phi_3)$$

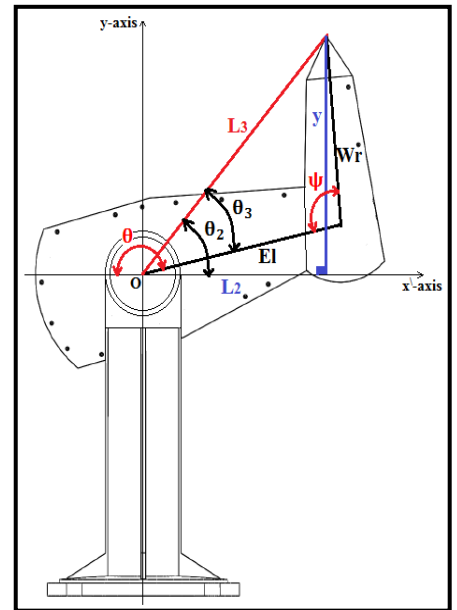


Рисунок 16. Передний вид левого плеча – нижнего локтя 3-DOF робота-манипулятора (RRR).

Инверсная кинематика: исследование и результаты

В этом исследовании использованы данные, представленные в таблице 4:

Таблица 4. Параметры вращения 3-DOF робота-манипулятора (RRR).

Манипулятор габариты (в мм)	X (мм)	Y (мм)	Z (мм)
Плечо = 127	500	200	300
Колено = 431.8	-500	-200	-300
Браслет = 351.79	-500	200	-300
	500	-200	300

После запуска программы с последними входными данными мы получим результаты, представленные в таблице 5:

Таблица 5. Вывод результатов вращения 3-DOF робота-манипулятора (RRR).

Координаты концевого эффектора (мм)	1-правого плеча Верхнего локтя	2-правого плеча Нижнего локтя	3 - левого плеча Верхнего локтя	4 - левого плеча Нижнего локтя
X = 500	PHI = -18.3837	PHI = -18. 3837	PHI = 136.456	PHI = 136.456
Y = 200	THE = 54.3942	THE = 344.332	THE = 125.606	THE = 195.668
Z = 300	PSAI = 100.174	PSAI = 259.826	PSAI = -100.174	PSAI = 100.174
X = -500	PHI = 161.616	PHI = 161.616	PHI = 316.456	PHI = 316.456
Y = -200	THE = 15.6678	THE = 305.606	THE = 164.332	THE = 234.394
Z = -300	PSAI = 100.174	PSAI = 259.826	PSAI = -100.174	PSAI = 100.174
X = -500	PHI = 161.616	PHI = 161.616	PHI = 316.456	PHI = 316.456
Y = 200	THE = 54.3942	THE = 344.332	THE = 125.606	THE = 195.668
Z = -300	PSAI = 100.174	PSAI = 259.826	PSAI = -100.174	PSAI = 100.174
X = 500	PHI = -18. 3837	PHI = -18. 3837	PHI = 136.456	PHI = 136.456
Y = -200	THE = 15.6678	THE = 305.606	THE = 164.332	THE = 234.394
Z = 300	PSAI = 100.174	PSAI = 259.826	PSAI = -100.174	PSAI = 100.174

В этой программе можно выбрать любую точку (X, Y, Z) в рамках ограниченного пространства вокруг манипулятора.

Кроме того, мы можем изменять размеры манипулятора в соответствии с требуемой конструкцией и решать обратные задачи кинематики для всех роботов-манипуляторов 3-DOF (RRR).

На Рисунке 17 представлен интерфейс соответствующей программы.



Рисунок 17. Интерфейс программы обратной кинематики.

2.3 Разработка траектории и решение задачи обратной кинематики управления SCARA робота-манипулятора с помощью LabVIEW и SolidWorks

Прямая и обратная кинематика программ SCARA робот

Для разработки алгоритмы управления роботами необходимо вычисление обратной кинематики в режиме реального времени. Решения задачи обратной кинематики в режиме реального времени работы роботов-манипуляторов является вычислительно дорогостоящим и обычно занимает длительное время.

В качестве контроллера для управления положением CAD-модели мы использовали инструментарий SoftMotion, алгоритм был разработан в LabVIEW для CAD-моделей с помощью программного комплекса Solidworks.

Объектом исследования прямой и обратной кинематики модели стал SCARA робот. Мы использовали новый геометрический подход для реализации метода в программе LabVIEW. На Рисунке 18 представлен дизайн графического интерфейса пользователя SCARA робот. В разработанном интерфейсе определяются и рассчитываются необходимые параметры для каждого соединения [78].

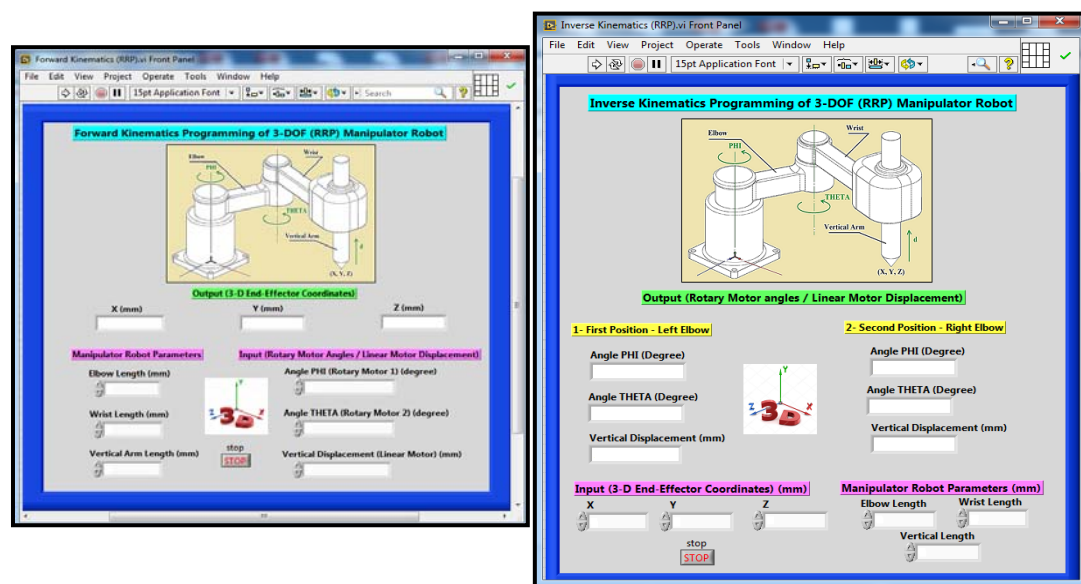


Рисунок 18. Интерфейс программы. Обратная кинематика SCARA робота.

Контроль SCARA робота

Управление роботом-манипулятором является давней областью исследования, за годы изучения роботов-манипуляторов были разработаны и описаны различные стратегии управления и контроля [34, 71, 96, 95]. Из-за того, что робот-манипулятор состоит из нескольких суставов, соединённых вместе, суставы имеют существенно нелинейную динамику с сильной связью между ними. Это усложняет задачу управления, особенно в условиях неопределённости модели или влияния внешних факторов.

В процессе изучения SCARA робота мы разработали конструкцию адаптивного контроллера слежения за траекторией на основе программы обратной кинематики и LabVIEW с использованием модуля NI-SoftMotion в качестве контроллера [78].

Этот контроллер работает на базе интеграции программ LabVIEW и Solidwork, где модуль NI SoftMotion, где модуль NI-SoftMotion работает для отправки и получения данных и информации об обратной кинематической проблеме. [99].

Основные преимущества программы

Программа инверсионной кинематики, разработанная с помощью LabVIEW и модуля NI SoftMotion, имеет следующие преимущества:

1. Этот метод может быть применен для решения обратной кинематической задачи, например – SCARA роботов-манипуляторов, но может быть использован для других манипуляторов.

2. С помощью нового разработанного геометрического подхода был проведён полный анализ возможных траекторий.

3. Главное преимущество этого метода состоит в том, что он не требует знаний предыдущих параметров движения робота.

5. Предлагаемая программа дает возможность инженерам-мехатроникам и инженерам-механикам определить все возможные траектории и выбрать подходящую при ограничениях на мощности приводов манипулятора и выбором короткого пути.

Интерфейс программы, представленный на рисунке 19, включает:

Входные параметры двух видов: во-первых, постоянные - размеры манипулятора (L , $E1$ и Wr), а во-вторых, переменные - Декартовы координаты концевого эффектора (x , y и z).

Выходные параметры - включают углы вращения и линейные перемещения (ϕ, θ, ψ)

ON/OFF - управление входом функции перемещения линии двигателей.

Остановка – выход из цикла и остановка управления движением.

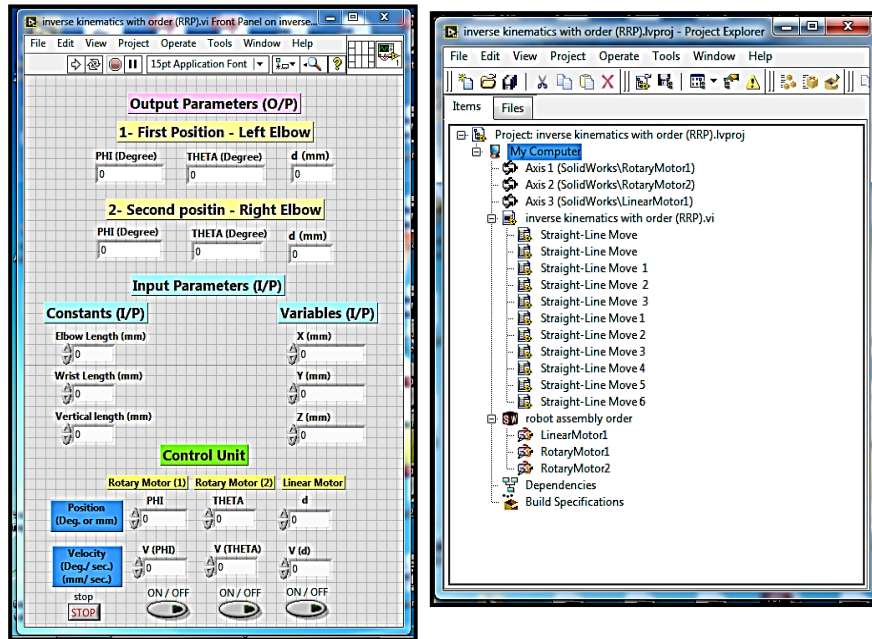


Рисунок 19. Интерфейс программы LabVIEW и SolidWorks обратной кинематики и траектории управления SCARA робот.



Диаграмма 3. Алгоритм обратной кинематики. Программирование внешнего вида и управления 3-DOF (RRP) роботом-манипулятором с помощью LabVIEW и SolidWorks.

Исследования кинематики SCARA робота-манипулятора (RRP)

На следующем Рисунке 20 представлена изометрическая проекция 3-DOF (RRP) робота-манипулятора по трем движущимся осям (например, в SCARA робот).

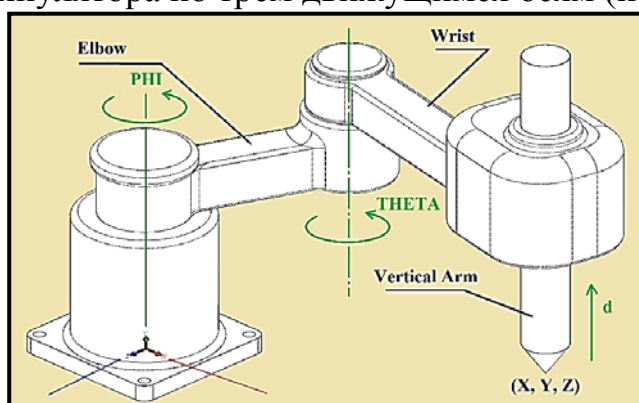


Рисунок 20. Изометрическая проекция SCARA (RRP) робота-манипулятора по трем движущимся осям.

SCARA робот - параметры ограничения:

$$1- L > 0 \quad 2- El > 0 \quad 3- Wr > 0 \quad 4- Wr > El$$

SCARA робот - набор ограничений:

$$1- \sqrt{x^2 + z^2} \geq (Wr - El), \quad 2- \sqrt{x^2 + z^2} \leq (Wr + El) \quad 3- 0 \leq d \leq L$$

Рабочее пространство на 3-DOF (RRP) манипуляторе

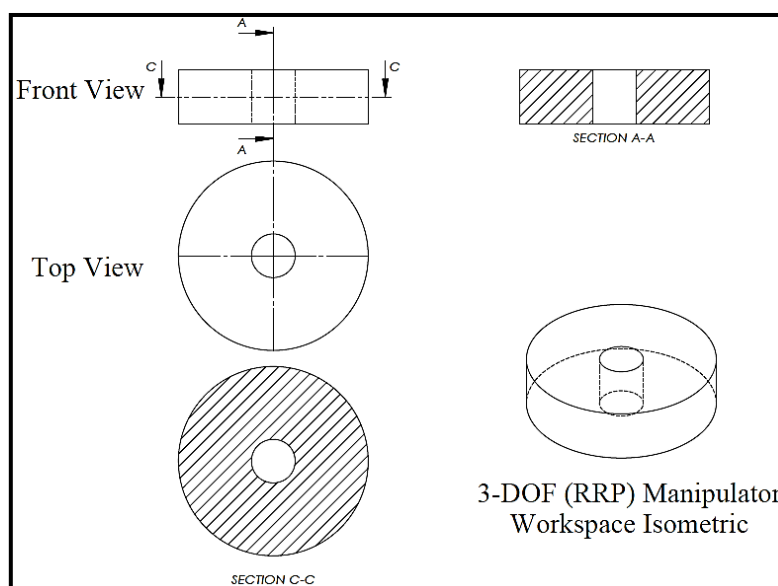


Рисунок 21. Изометрический вид на разрез рабочего пространства 3-DOF (RRP) робота-манипулятора.

Аналогично рассмотренному ранее рабочему пространству робота RRR рассмотрим рабочее пространство робота RRP (см. Рисунок 21).

Какие существуют ограничения для SCARA робота (RRP)?

Доступное рабочее место представляет собой вертикальный полый цилиндр со следующими параметрами:

1- максимальный наружный диаметр:

$$2(Wr + El);$$

2- минимальный внутренний диаметр:

$$2(Wr - El);$$

3 - максимальная высота вертикального полого цилиндра:

$$L .$$

Траектория управления концевым эффектором SCARA робота [78]:

О/Р положение концевого эффектора	Порядок поворотного электродвигателя (ϕ)	Порядок поворотного электродвигателя (θ)
Первая позиция - Левый локоть	(1) + ϕ	(2) + θ
	(2) + ϕ	(1) + θ
	(1) + ϕ -360	(2) + θ -360
	(2) + ϕ -360	(1) + θ -360
	(1) + ϕ	(2) + θ -360
	(2) + ϕ	(1) + θ -360
	(1) + ϕ -360	(2) + θ
	(2) + ϕ -360	(1) + θ
Вторая позиция - Правый локоть	(1) + ϕ	(2) + θ
	(2) + ϕ	(1) + θ
	(1) + ϕ -360	(2) + θ -360
	(2) + ϕ -360	(1) + θ -360
	(1) + ϕ	(2) + θ -360
	(2) + ϕ	(1) + θ -360
	(1) + ϕ -360	(2) + θ
	(2) + ϕ -360	(1) + θ

Таблица 5. Выходные результаты 16 - возможные траектории движения концевого эффектора SCARA робота.

С программой управления обратной кинематикой SCARA робота мы можем контролировать порядок использования и угол поворота поворотных двигателей 1,

2 (ϕ, θ) в обеих O/P out-позиции: Первая позиция - Левый локоть и Вторая позиция - Правый локоть.

У нас появилась возможность получить разные траектории для достижения требуемой точки, путем управления порядком и расположением поворотных двигателей: первого, второго и т. д. , с учётом чтобы траектория движения исключала манипулятора контакт его части с любым другим объектом, существующем в рабочем пространстве манипулятора. Таким образом, все это делает возможным использовать альтернативные и доступные решения для выбора оптимальной траектории. [8].

Возможные решения для обратной кинематики 3-DOF (RRP) робота-манипулятора:

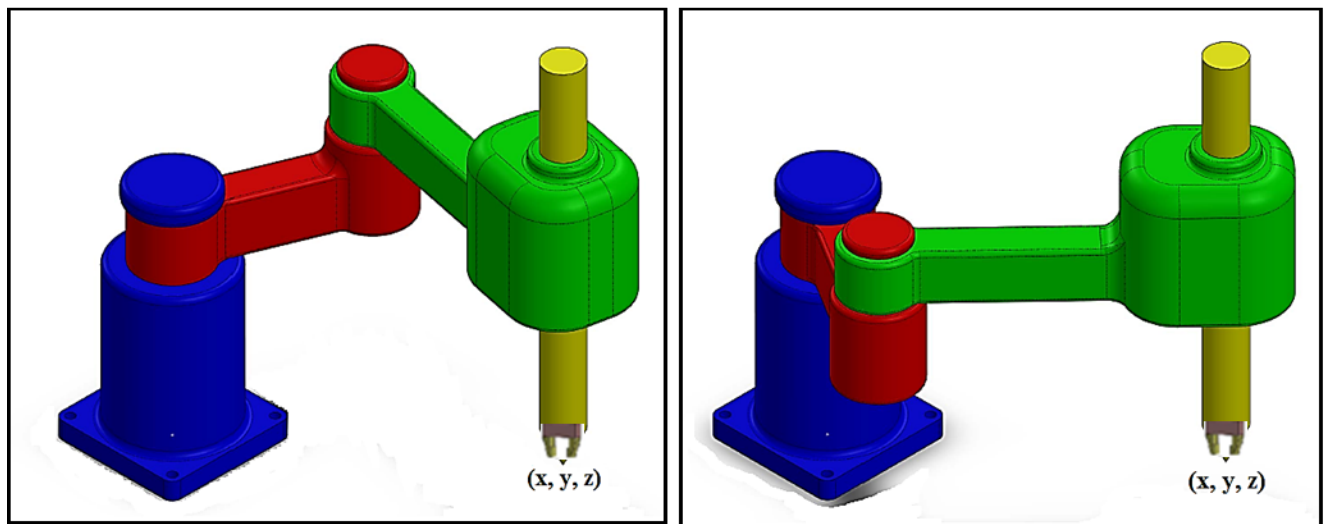


Рисунок 22. Два возможных положения решения 3-DOF (RRP) робота-манипулятора: 1- Первая позиция - Левый локоть. 2 - Вторая позиция - Правый локоть.

Существует два возможных решения для достижения концевым эффектором манипулятора заданной точки (x, y, z), если момент расположен внутри рабочего пространства манипулятора - внутри вертикального полого цилиндра, так как показано на Рисунке 22.

Решить проблему достижения концевым эффектором манипулятора определенной точки (x, y, z) возможно, если эта точка находится в рабочем пространстве манипулятора (в очертания вертикального полого цилиндра).

Но можно найти решение и в том случае, если специальные точки (x, y, z) расположены за пределами рабочего пространства манипулятора (за пределами вертикального полого цилиндра).

В- Математическая модель программирования нового разработанного геометрического подход обратной кинематики (ИК):

$$L_1 = \sqrt{x^2 + z^2}$$

$$\phi_2 = \cos^{-1}\left(\frac{z}{L_1}\right)$$

$$\phi_3 = \cos^{-1}\left(\frac{L_1^2 + El^2 - Wr^2}{2 \times L_1 \times El}\right)$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{Wr^2 + El^2 - L_1^2}{2 \times Wr \times El}\right)$$

$$d = y$$

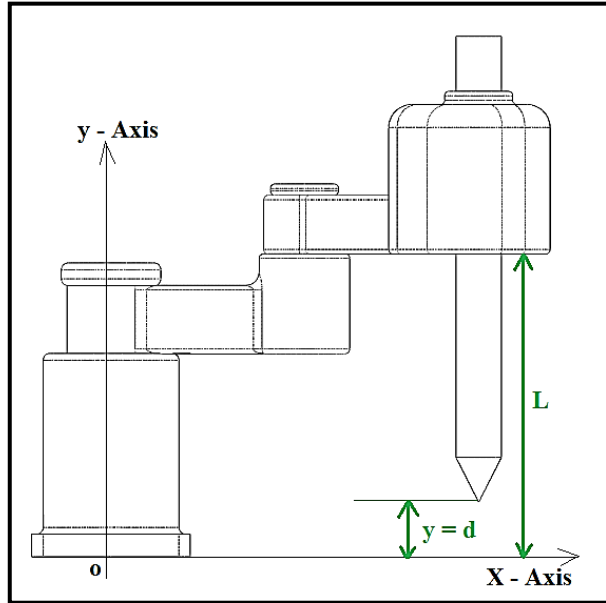


Рисунок 23. Вид спереди левого локтя 3-DOF (RRP) робота-манипулятора.

1- первая позиция: Левый локоть (LE)

1- в случае, если $(x > 0)$ и $(z \geq 0)$, а затем:

$$\phi = (\phi_2 + \phi_3)$$

2- Если $(x \geq 0)$ и $(z < 0)$, а затем:

$$\phi_2 = \cos^{-1}\left(\frac{z}{L_1}\right), \quad \phi = (\phi_2 + \phi_3)$$

3- Если $(x < 0)$ и $(z \leq 0)$, а затем:

$$\phi_2 = \sin^{-1}\left(\frac{x}{L_1}\right), \quad \phi = 180 + (\phi_2 + \phi_3)$$

4- в случае, если $(x \leq 0)$ и $(z > 0)$, а затем:

$$\phi_2 = \sin^{-1}\left(\frac{x}{L_1}\right), \quad \phi = (\phi_2 + \phi_3)$$

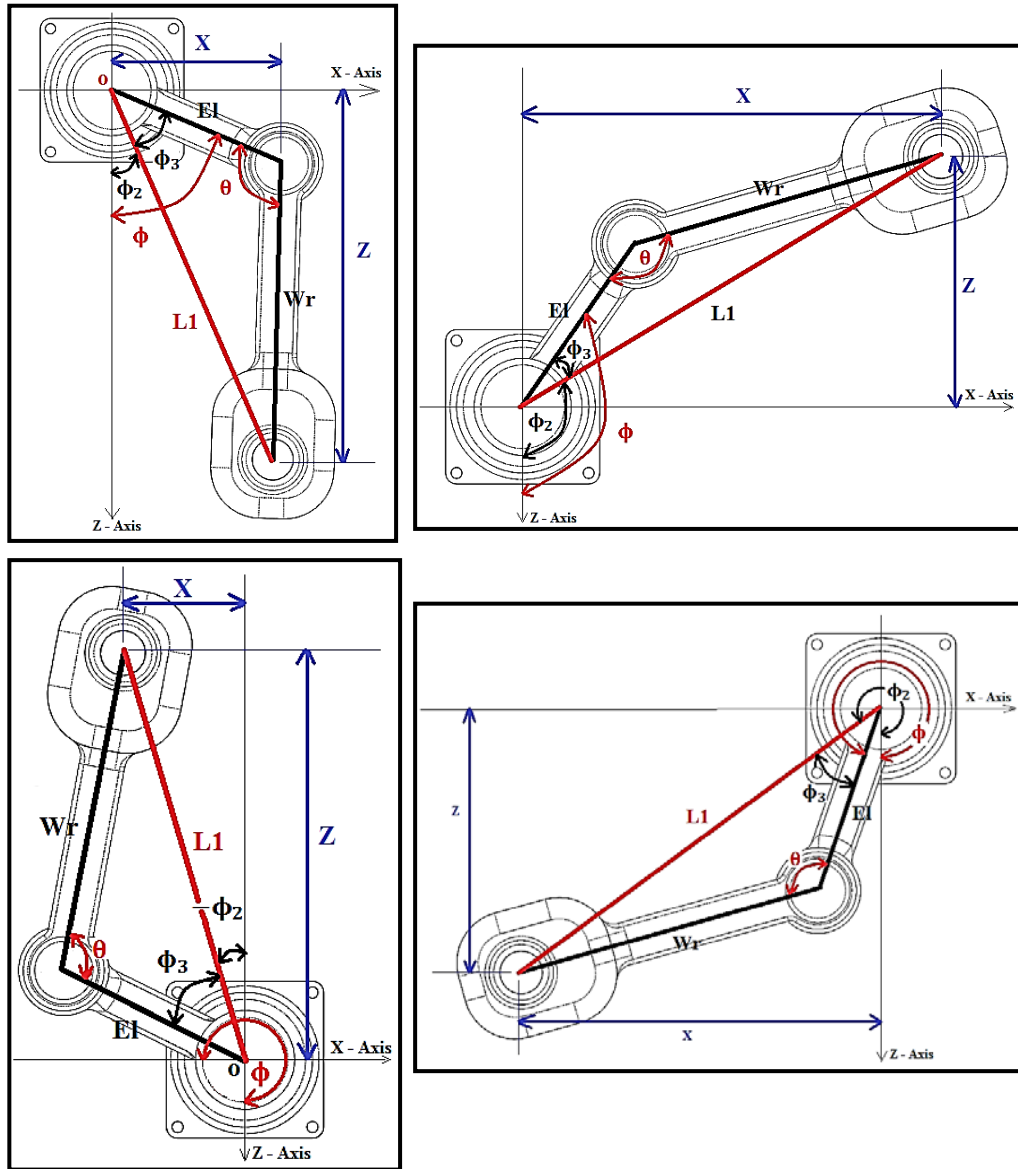


Рисунок 24. Вид сверху на левый локоть, если $(x > 0), z \geq 0)$ && $(x \geq 0) (z < 0)$ && $(x < 0), (Z \leq 0)$ и $(x \leq 0), z > 0)$.

II - Вторая позиция: Правый локоть (RE)

$$\theta = 360 - \cos^{-1} \left(\frac{Wr^2 + El^2 - L_1^2}{2 \times Wr \times El} \right)$$

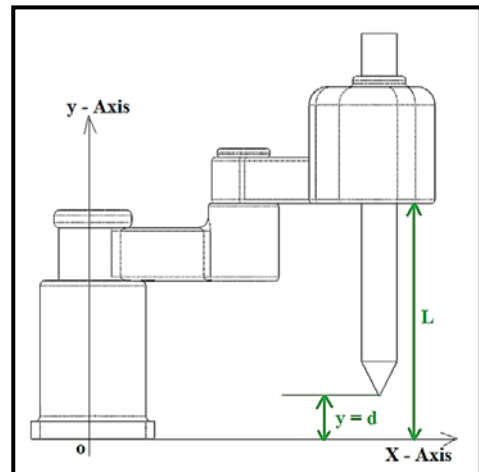


Рисунок 25. Вид спереди правого локтя 3-DOF (РПР).

1- в случае, если $(x > 0)$ и $(z \geq 0)$, а затем:

$$\phi = 360 - (\phi_3 - \phi_2)$$

2- Если $(x \geq 0)$ и $(z < 0)$, а затем:

$$\phi_2 = \cos^{-1}\left(\frac{z}{L_1}\right), \quad \phi = (\phi_2 - \phi_3)$$

3- Если $(x < 0)$ и $(z \leq 0)$, а затем:

$$\phi_2 = \sin^{-1}\left(\frac{x}{L_1}\right), \quad \phi = 360 - (180 + (\phi_2 + \phi_3))$$

4- в случае, если $(x \leq 0)$ и $(z > 0)$, а затем:

$$\phi_2 = \sin^{-1}\left(\frac{x}{L_1}\right), \quad \phi = 360 + (\phi_2 - \phi_3)$$

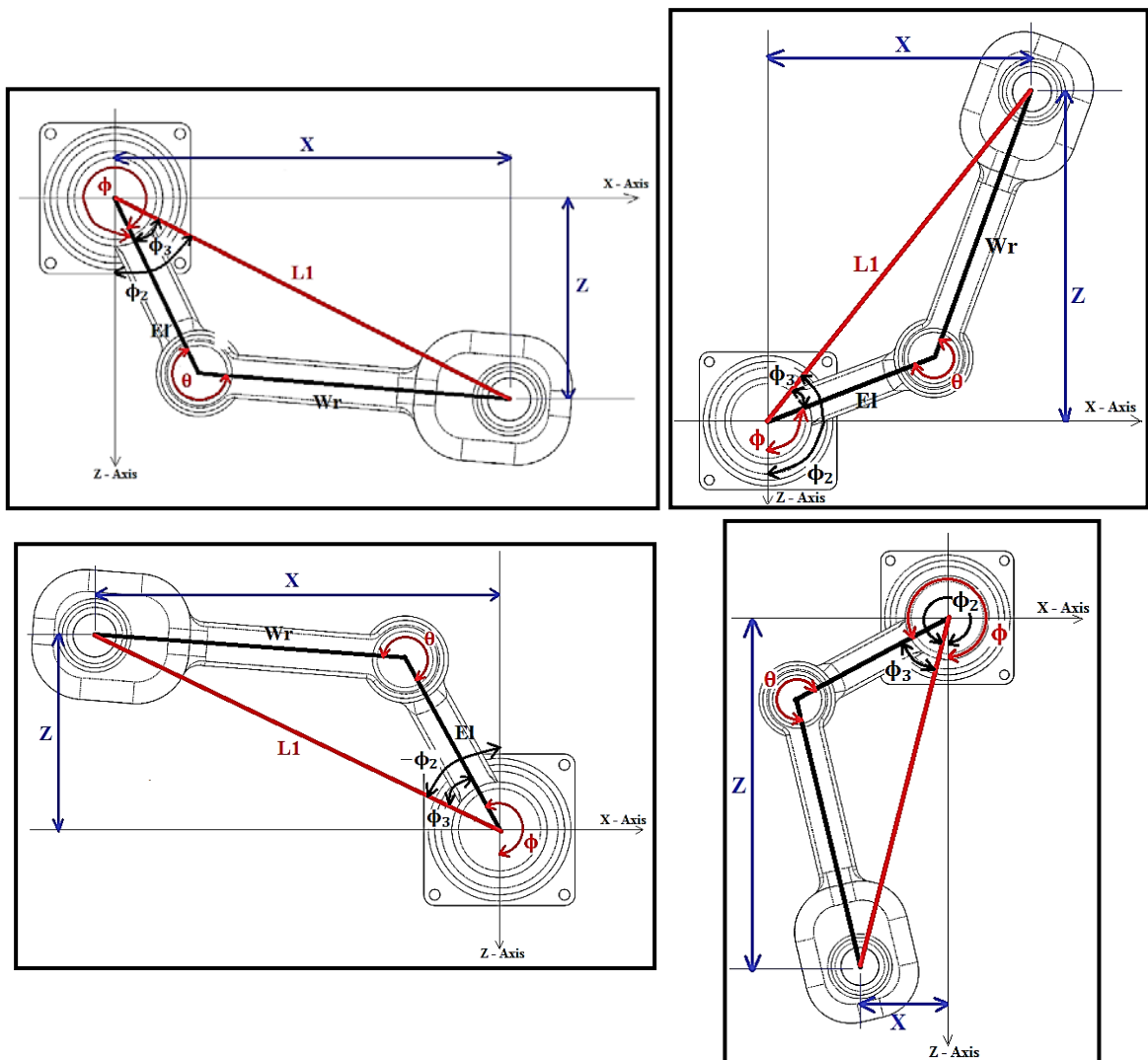


Рисунок 26. Вид сверху на правый локоть при $(x > 0), z \geq 0)$ && $(x \geq 0) (z < 0)$
&& $(x < 0), (z \leq 0)$ и $(x \leq 0) (z > 0)$.

Размеры манипулятора (mm)	X	Y	Z
Elbow = 450	$X_0 = 0$	$Y_0 = 0$	$Z_0 = -270$
Wrist = 720			
Vertical Arm = 670	$X_f = 500$	$Y_f = 300$	$Z_f = 600$

Таблица 6: Входные параметры программы обратного кинематики управления роботом SCARA.

Тематическое исследование

В этом исследовании мы использовали входные параметры робота-манипулятора 3DOF, показанные в Таблице 6.

После выполнения программы с указанными входными данными мы получаем выходные результаты, показанные в Таблице 7:

Таблица 7. Выходные результаты программы обратной кинематики и управления роботом SCARA.

О/П положение конечного эффектора	Номер графика траектории	Порядок Степени (ϕ)	Порядок степени (θ)	Длина траектории (mm)
Первая позиция – Левый локоть.	6	(1) +105.1	(2) +80.1	1502.3
	9	(2) +105.1	(1) +80.1	2439.4
	2	(1) -254.9	(2) -279.9	4718.1
	13	(2) -254.9	(1) -279.9	6991.8
	5	(1) +105.1	(2) -279.9	4011.9
	15	(2) +105.1	(1) -279.9	4949.0
	7	(1) -254.9	(2) +80.1	2208.5
	10	(2) -254.9	(1) +80.1	4482.2
Вторая позиция – Правый локоть.	1	(1) +334.5	(2) +279.9	5093.2
	12	(2) +334.5	(1) +279.9	8077.0
	3	(1) -25.5	(2) -80.1	1127.1
	11	(2) -25.5	(1) -80.1	1354.2
	8	(1) +334.5	(2) -80.1	2583.6
	16	(2) +334.5	(1) -80.1	5567.4
	4	(1) -25.5	(2) +279.9	3636.7
14	(2) -25.5	(1) +279.9	3863.8	

Анализ результатов

С помощью программы обратной кинематики и управления роботом SCARA мы получили возможность управлять порядком и расположением вращающихся двигателей 1, 2 (ϕ, θ) в обоих положениях выхода О / П: первая позиция - левый локоть и вторая позиция - правый локоть. Мы описали 16 возможных траекторий концевой эффектора при переходе от одной точки к другой и показали это на рисунках.

Из возможных траекторий, представленных как выходные результаты программы, мы можем выбрать оптимальную, ориентируясь на минимальное значение длины траектории - более короткий путь, при котором достигается экономия рабочего времени и энергии. Таким образом, оптимальными траекториями являются следующие:

- 1- Первая оптимальная траектория - номер 3 с минимальной длиной пути 1127.1 мм.
2. Вторая оптимальная траектория - номер 11 с длиной пути 1354.2 мм.

Этот программный интерфейс обратной кинематики может использоваться для любых трех степеней свободы в качестве робота-манипулятора Revolute-Revolute-Prismatic 3-DOF (RRP) (например, существующего в роботе SCARA), с любыми размерами длины.

Траекторией манипулятора можно управлять путем упорядочения вращения двигателей, чтобы избежать контакта и прилипания к кому-либо, находящемуся в рабочем пространстве манипулятора.

Выбор оптимальной траектории из всех возможных траекторий выходных результатов программы осуществляется путем выбора минимального значения длины траектории (более короткой траектории), при которой достигается экономия рабочего времени и энергопотребления.

Наконец, эта программа экономит много времени на вычисления по сравнению с другими методами вычислений, такими, как численные и алгебраические методы, и дает нам точный результат.

Поэтому получаем 16 возможных траекторий траектории концевой эффектора при перемещении из точки в другую, как показано на Рисунках 21 и 22.

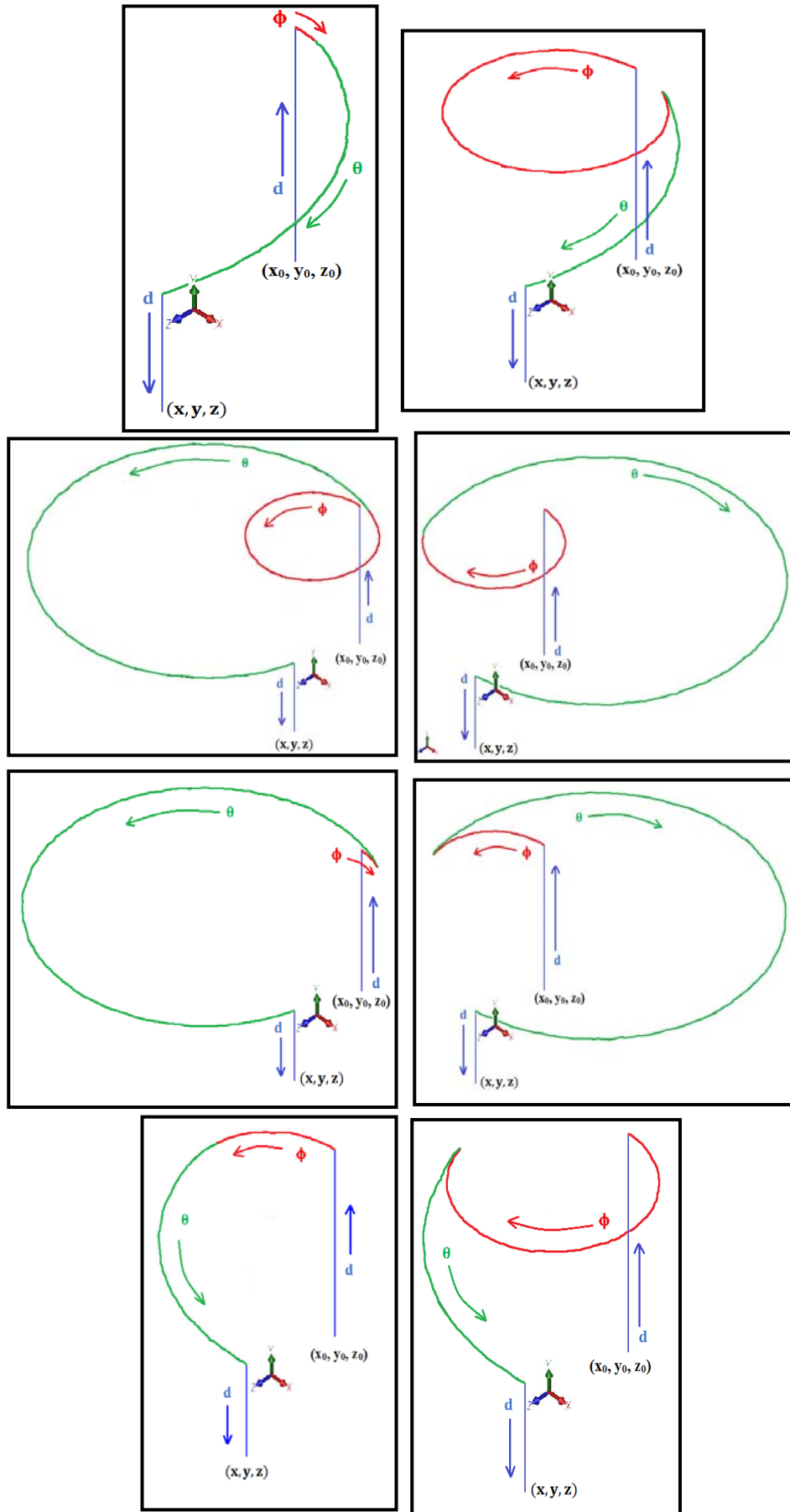


Рисунок 27. Возможные траектории от начальной точки (x_0, y_0, z_0) конечного эффектора SCARA робота до конечной точки (x, y, z) , когда порядок и расположения поворотного двигателя 1(ϕ) является первым.

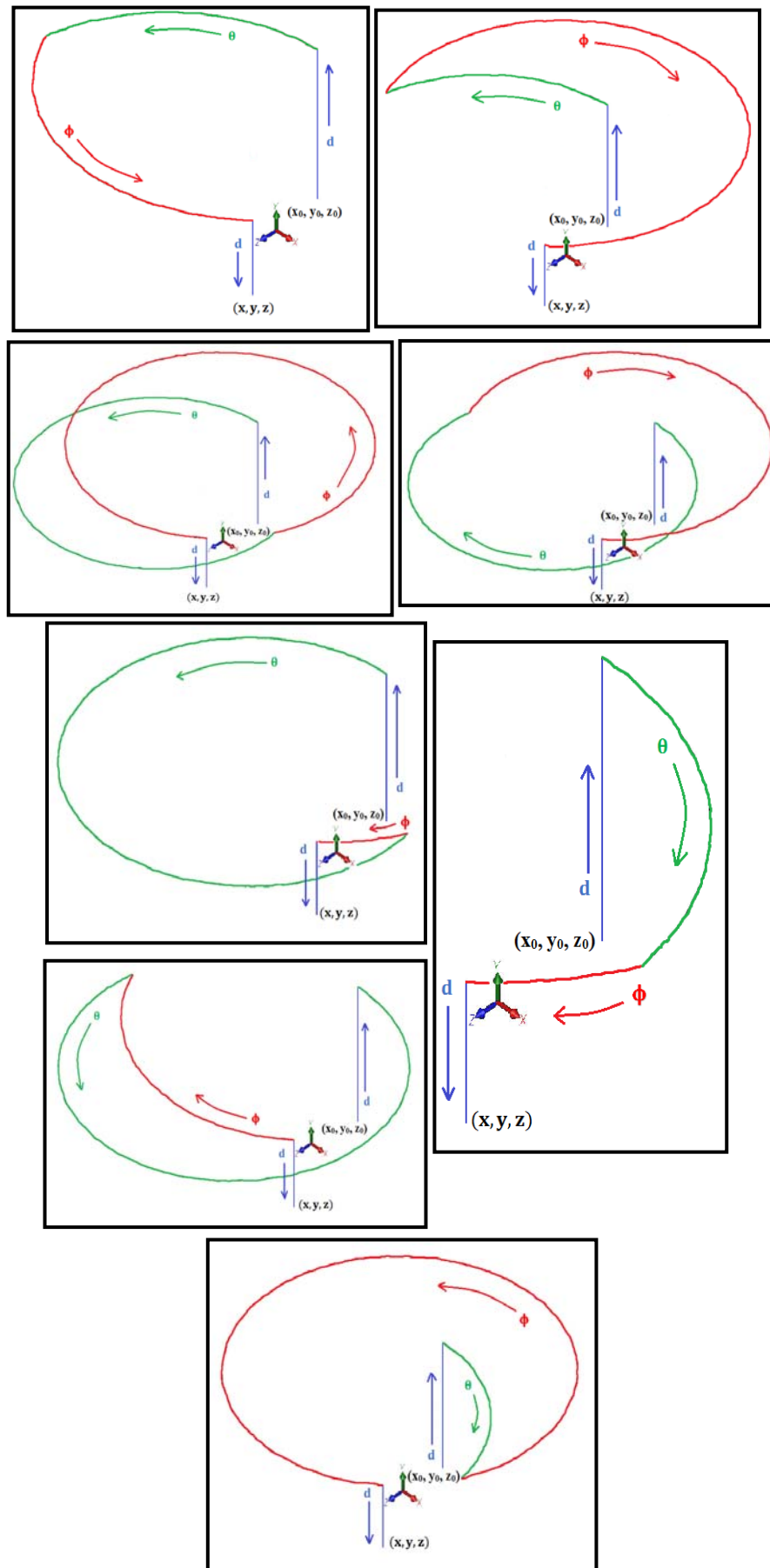


Рисунок 28. Возможные трехмерные траектории от начальной точки (x_0, y_0, z_0) конечного эффектора SCARA робота до конечной точки (x, y, z) , когда порядок и расположение поворотного двигателя 2 (θ) является первым.

2.4 Исследование программного обеспечения обратной кинематики роботоманипулятора KUKA и оптимальное управление траекторией

Контроль роботов-манипуляторов был областью исследований в течение многих лет, в течение которых были разработаны различные стратегии управления [34, 71,96]. Все больше и больше задач в различных отраслях, например, в пищевой промышленности, частично или полностью выполняет роботизированный манипулятор.

Чтобы разработать основанные на модели контроллеры для роботизированного манипулятора, необходима его кинематическая модель. Кроме того, если рассматриваются задачи, связанные с роботизированным оружием, полезно провести кинематическое моделирование движений и взаимодействий роботов в целях получения надежных результатов моделирования и выбора оптимальной траектории конечных эффекторов манипуляторов. В пищевой отрасли гибкость является наиболее востребованным свойством для современной производственной линии. Пищевая отрасль является быстроразвивающейся отраслью, ориентированной на потребности клиентов в качестве и способной быстро реагировать на изменения в кратчайшие сроки и с наименьшими затратами [103]. Гибкость может рассматриваться как способность системы изменять и принимать различные положения или состояния в ответ на изменяющиеся требования с минимальными затратами времени, усилий, затрат или производительности [38].

В этом исследовании на роботе KUKA была разработана конструкция адаптивного контроллера отслеживания траектории на основе программы обратной кинематики и LabVIEW с использованием модуля NI-SoftMotion в качестве контроллера.

Этот контроллер разработан на основе связи между программами LabVIEW и Solidwork, где модуль NI-SoftMotion работает для отправки и получения данных и информации об обратной кинематической проблеме.

ОБРАТНАЯ КИНЕМАТИКА МАНИПУЛЯТОРА KUKA 4R ROBOT

Основные преимущества предлагаемой управляющей программы

Использование программы обратной кинематики в среде LabVIEW с

использованием модуля NI-SoftMotion в качестве контроллера имеет следующие преимущества:

1. Этот метод управления может быть применен к обратной кинематической задаче, которая имеет место в случае робота-манипулятора KUKA и может быть использована у других манипуляторов.
2. Полный анализ был выполнен с использованием метода на основе нового геометрического подхода.
3. Метод применим для управления большинством систем роботов-манипуляторов.
4. Основным преимуществом этого метода является то, что он не требует предварительного знания динамики робота.
5. Предлагаемая управляющая программа даст возможность инженерам в области машиностроения (в том числе и инженерам-мехатроникам) анализировать все возможные траектории с целью выбора подходящей трассы и сохранения мощности приводов манипулятора путем выбора короткого пути.

Различия между предлагаемой разработанной методикой и традиционной методикой (DH):

Различия	Предлагаемая методика (сводит задачу к двумерной)	Традиционная методика The Denavit–Hartenberg (DH) (3-трёхмерная задача)
Математические требования	Не содержит высоких требований к математическому обеспечению, т.к. не использует матриц	Использует гомогенные матрицы 4x4 заданной структуры (John J. Craig 2005)
Программное обеспечение	Легко реализуется в программных пакетах (наша реализация – LabVIEW)	Высокие требования к математическому обеспечению, вызванные использованием матриц
Точность	Сохраняется точность вычислений	Вычисления производятся с ограниченной точностью (Taylor, 1979)
Сингулярность	Использование для представления позиций и ориентаций, что обеспечивает кинематику роботов и позволяет избегать сингулярностей	Сингулярность и нелинейные выражения совместных отношений являются основной проблемой в методе однородных матриц (Aydin and Kucuk, 2006)

В. Части блок-схемы представлены следующим образом:

Входные параметры - включают в себя два типа: первый – фиксированные параметры манипулятора (E1, W1 и G1), а второй – декартовы координаты концевой эффектора (x, y и z).

Выходные параметры - включают в себя углы поворота (ϕ , θ , ψ и γ).

ON / OFF - Управление входом функции перемещения двигателей.

Стоп - выход из цикла и остановка управлением движением.

Интерфейсные программы LabVIEW и SolidWorks для управления обратной кинематикой и траекторией робота KUKA 4R показаны ниже на Рисунке 29.

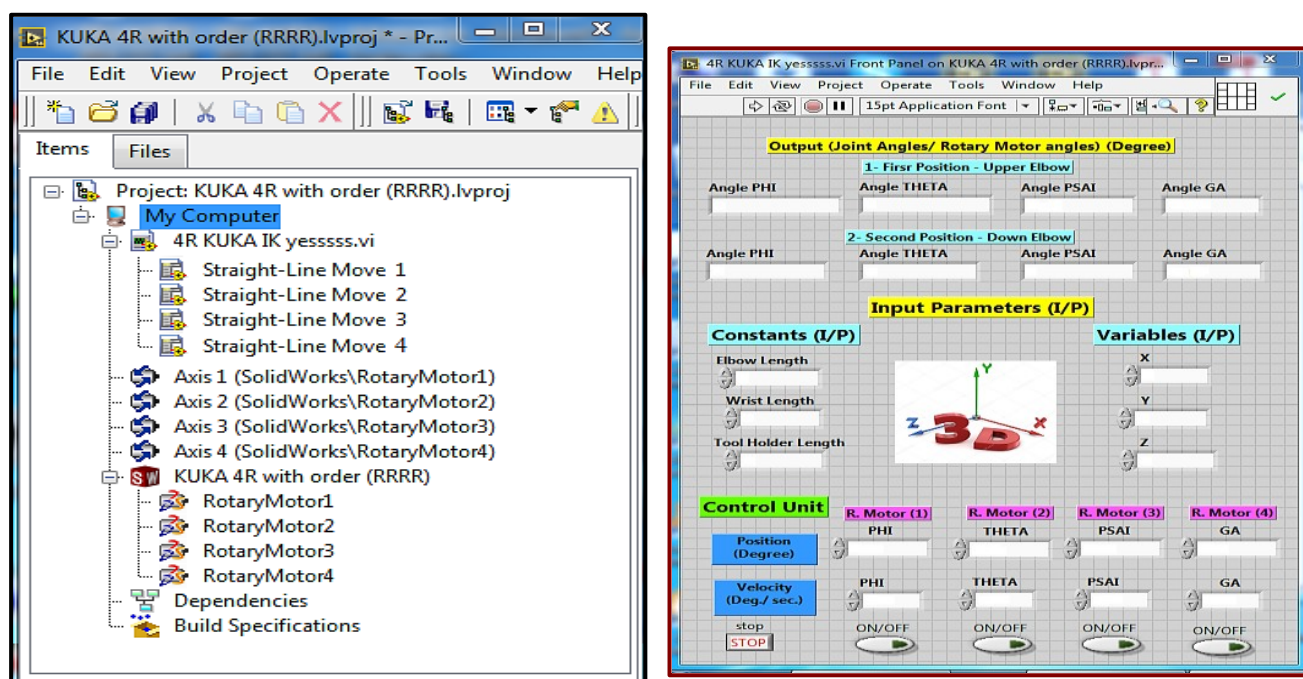


Рисунок 29. Интерфейс программ LabVIEW и SolidWorks для управления обратной кинематикой и траекторией робота KUKA 4R.

Алгоритм программирования обратной кинематики. Проектирование и управление роботом-манипулятором 4-DOF (RRRR) с использованием LabVIEW и SolidWorks показано ниже на Диаграмме 4.



Диаграмма 4. Проектирование и управление роботом-манипулятором 4-DOF (RRRR) с использованием LabVIEW и SolidWorks.

Применение манипуляторов в производственных линиях пищевых производств

Роботы-манипуляторы уже используются в пищевой промышленности, в частности, для обработки сельскохозяйственного сырья (фрукты, овощи, мясо и т.д.). В дальнейшем их использование будет только расширяться.

Применение манипуляторов в производстве упаковки из пластмасс и полимеров

Роботы применяются в таких манипуляциях, как литье под давлением с помощью робота, роботизированный захват и установка, роботизированная сборка без участия человека. Роботизированные манипуляторы могут использоваться во всех областях производства: создание упаковки из полимеров (включая упомянутое литье под давлением), наполнение упаковок пищевой продукцией, погрузку и разгрузку, упаковку и укладку на поддоны, размещение. Гибкость программного комплекса является ключевым фактором в автоматизации работ с изделиями из

пластмасс и полимеров, поскольку позволяет использовать разные материалы, что требуют определенной перенастройки режимов обработки и температурных диапазонов. Перевести работа к новому процессу быстро и легко, что дает возможность автоматизировать практически любую задачу, в том числе касающуюся работы с небольшими партиями. Таким образом, можно увеличивать или уменьшать производство продукции.

Роботизированные манипуляторы в пищевой промышленности могут использоваться для смешивания сырья, подсчета, дозирования, проверки упаковки и др. Чрезвычайно важным является то, что роботы могут предотвращать ошибки, связанные с человеческим фактором, защищать продукты с гигиенической точки зрения, способствовать повышению производительности труда и сохранению высокого качества продукта.

Роботы помогают соблюдать строгие требования к точности, качеству и гигиене. Манипуляторы снабжены гладким внешним корпусом, который практически не собирает пыль и отложения. Роботизированные руки достаточно малы, что позволяет вписаться практически в любой пищевой процесс. Простое программирование дает возможность использовать их для широкого спектра действий, а программы можно повторно использовать для повторяющихся процессов.

Преимущества манипуляторов в пищевой промышленности:

- Герметично для использования в гигиенических средах.
- Специально разработанный внешний корпус служит для уменьшения скопления пыли и мусора.

KUKA 4R Манипулятор-робот [80]

На Рисунке 30 показана изометрия робота-манипулятора с 4 степенями свободы (RRRR) с тремя движущимися осями (например, существующего в работе KUKA).

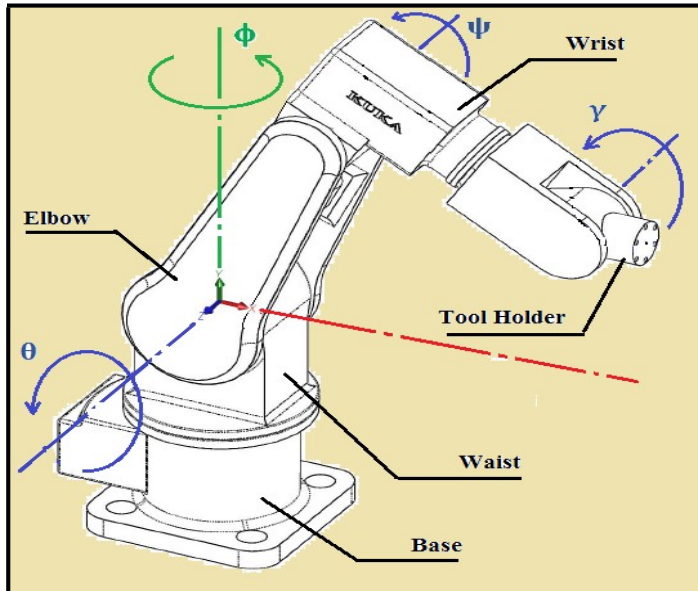


Рисунок 30. Изометрия робота-манипулятора с 4 степенями свободы (RRRR) с тремя движущимися осями.

Ограничения параметров робота-манипулятора:

$$1- El > 0; \quad 2- Wr > 0; \quad 3- Gr > 0; \quad 4- El > Wr > Gr.$$

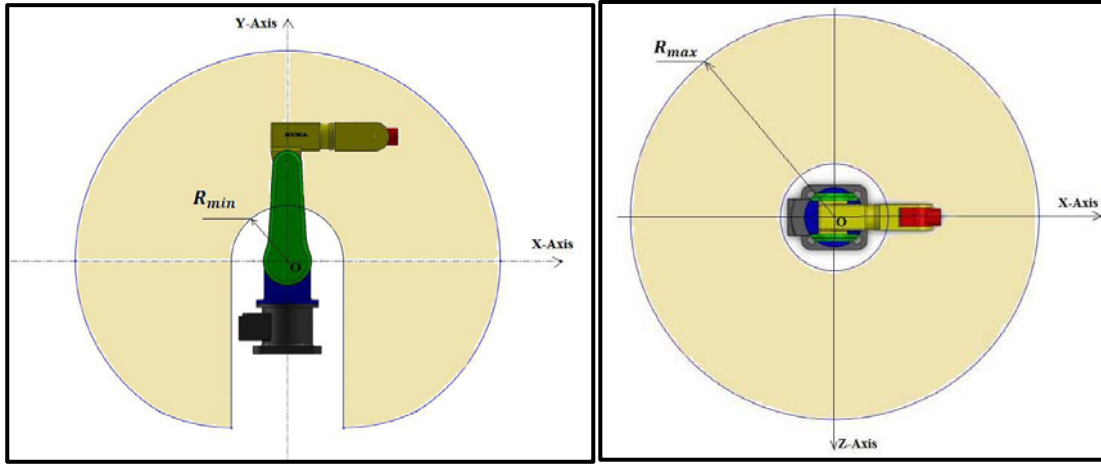
Ограничения рабочего пространства робота-манипулятора:

$$1- \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \geq (Wr + Gr - El)$$

$$2- \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \geq (El + Wr + Gr)$$

Рабочее пространство роботизированного манипулятора 4-DOF (RRRR)

При выполнении задач манипулятор должен достичь нескольких заготовок или приспособлений. В одних случаях их можно расположить по мере необходимости в соответствии с рабочим пространством манипулятора. В других случаях робот может быть установлен в фиксированной среде с жесткими требованиями к рабочему пространству [34]. Рабочее пространство также иногда называют рабочим объемом (см. вид спереди и сверху, показанные на Рисунке 31).



Каковы ограничения для 4-DOF (RRR) роботизированного манипулятора руки?

Достижимое рабочее пространство выглядит как полая сфера, где:

1- Максимальный наружный диаметр будет:

$$2(El + Wr + Gr).$$

2- Минимальный внутренний диаметр будет:

$$2(Wr + Gr - El).$$

Возможные решения для обратной кинематики робота-манипулятора KUKA с 4 степенями свободы (RRRR)

Два возможных решения положения 4-DOF (RRRR) робота-манипулятора при одном и том же наклоне держателя инструмента на плоскости xu показаны ниже на Рисунке 32:

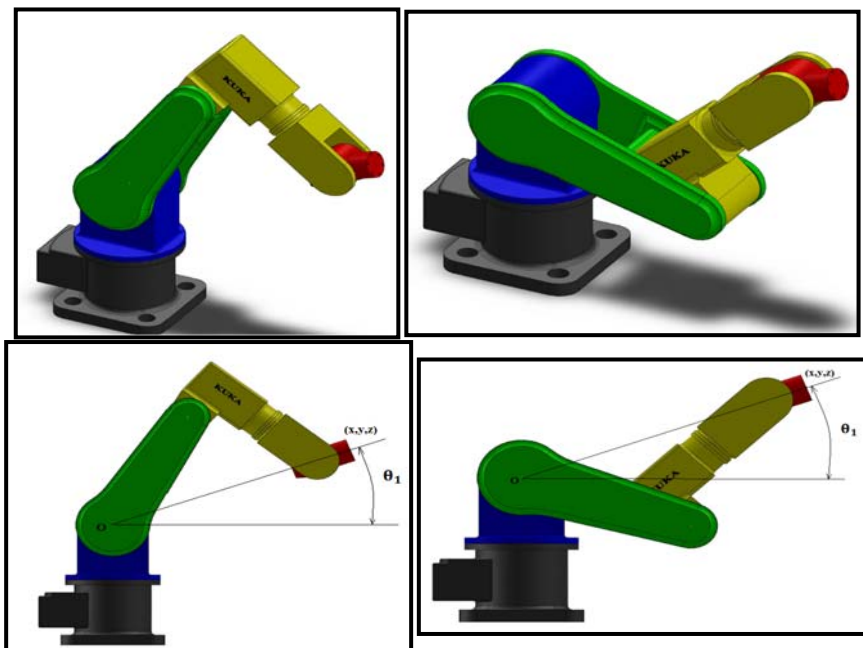


Рисунок 32. Два возможных решения положения 4-DOF робота-манипулятора (RRRR) при одном и том же наклоне держателя инструмента на плоскости xu . 1- Первая позиция - верхний локоть. 2- Вторая позиция - нижний локоть.

- Существует два возможных решения для достижения концевым эффектором манипулятора заданной точки в (x, y, z) , если эта точка была расположена внутри рабочей области манипулятора (внутри полый сферы).
- Возможного решения нет, если целевая точка в (x, y, z) была расположена вне рабочей области манипулятора (вне полый сферы).

Для робота KUKA получены как прямые, так и обратные кинематические модели, в программе LabVIEW реализован новый метод геометрического подхода.

В разработанном интерфейсе требуемые параметры определяются и рассчитываются для каждого соединения. Интерфейс программы прямой и обратной кинематики робота KUKA приведены в нашем исследовании.

Математическое программирование модели робота KUKA с помощью нового геометрического подхода к изучению обратной кинематики (ИК). Определение параметров.

$$L_2 = \sqrt{x^2 + z^2 + y^2}, \quad \theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + z^2}}\right), \quad M = L_2 - Gr, \quad y_1 = M \times \sin(\theta_1),$$

$$\phi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{z}{x}\right), \quad N = M \times \cos(\theta_1), \quad x_1 = N \times \cos(\phi_1), \quad z_1 = N \times \sin(\phi_1)$$

Когда $(x \leq 0) \ \&\& \ (z > 0)$, тогда:

$$x_1 = -N \times \cos(\phi_1), \quad z_1 = -N \times \sin(\phi_1)$$

Когда $(x \leq 0) \ \&\& \ (z < 0)$, тогда:

$$x_1 = -N \times \cos(\phi_1), \quad z_1 = -N \times \sin(\phi_1)$$

$$L_1 = \sqrt{x_1^2 + z_1^2}, \quad \alpha = \cos^{-1}\left(\frac{Wr^2 + \sqrt{x_1^2 + z_1^2 + y_1^2} - El^2}{2 \times Wr \times \sqrt{x_1^2 + z_1^2 + y_1^2}}\right), \quad \phi_2 = \tan^{-1}\left(\frac{z_1}{x_1}\right),$$

$$L_3 = \sqrt{L_1^2 + y_1^2}, \quad \theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{y_1}{L_1}\right), \quad \theta_3 = \cos^{-1}\left(\frac{L_3^2 + El^2 - Wr^2}{2 \times L_3 \times El}\right)$$

Вид спереди верхнего колена робота-манипулятора с 4 степенями свободы (RRRR) показан ниже на рисунке 33.

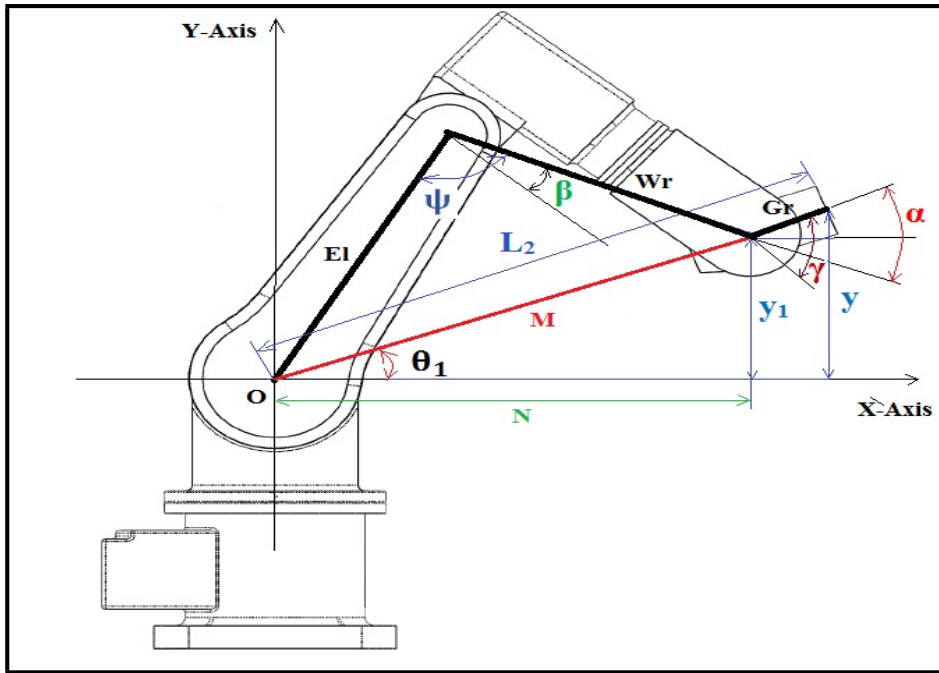


Рисунок 33. Вид спереди верхнего локтя робота-манипулятора с 4 степенями свободы (RRRR).

$$\theta = (\theta_2 + \theta_3) - 90, \quad \psi = \cos^{-1} \left(\frac{Wr^2 + El^2 - L_3^2}{2 \times Wr \times El} \right) - (90 + \beta), \quad \gamma = (\alpha + \beta)$$

i- Первая позиция: верхний локоть (UE)

1- Когда $(x1 > 0)$ и $(z1 \geq 0)$, тогда:

$$\phi = -\phi_2$$

2- Когда $(x1 \geq 0)$ и $(z1 < 0)$, тогда:

$$\phi_2 = \cos^{-1} \left(\frac{x_1}{L_1} \right), \quad \phi = \phi_2$$

3- Когда $(x1 < 0)$ и $(z1 \leq 0)$, тогда:

$$\phi = 180 - \phi_2.$$

4- Когда $(x1 \leq 0)$ и $(z1 > 0)$, тогда:

$$\phi_2 = \sin^{-1} \left(\frac{z_1}{L_1} \right), \quad \phi = 180 + \phi_2.$$

Вид сверху верхнего и нижнего локтя, когда $(x > 0), (z \geq 0)$ && $(x \geq 0), (z < 0)$ && $(x < 0), (z \leq 0)$ и $(x \leq 0), (z > 0)$, как показано ниже 34.

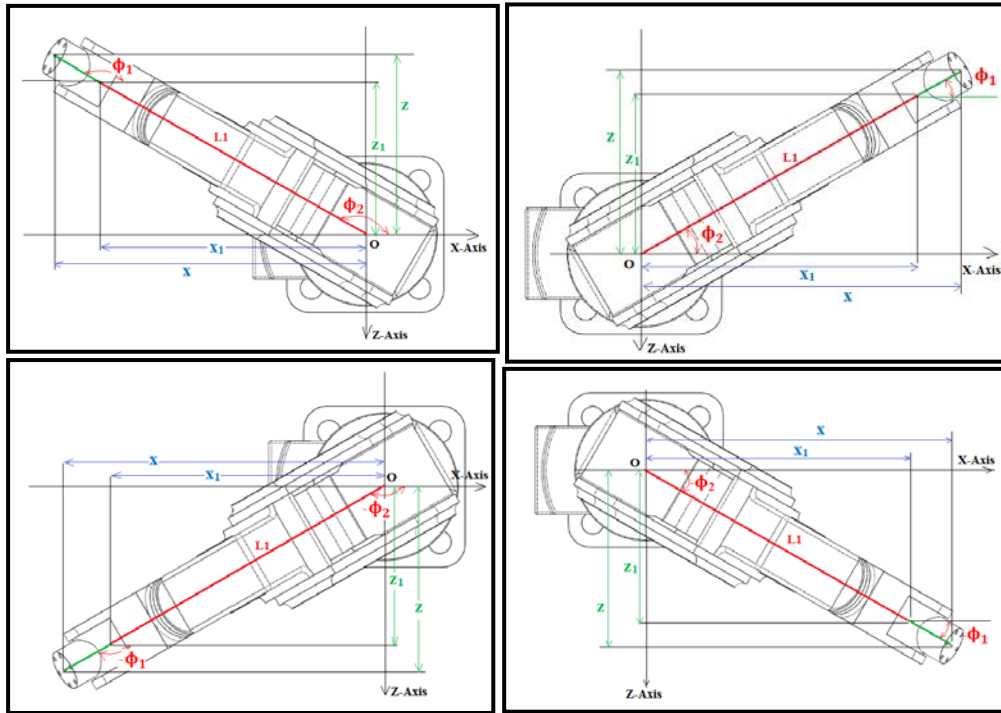


Рисунок 34. Вид сверху верхнего и нижнего локтя.

ii- Вторая позиция: вниз локоть (DE)

$$\theta = (\theta_2 - \theta_3) - 90, \quad \psi = 270 - \left(\cos^{-1} \left(\frac{Wr^2 + El^2 - L_3^2}{2 \times Wr \times El} \right) + \beta \right), \quad \gamma = (\beta - \alpha).$$

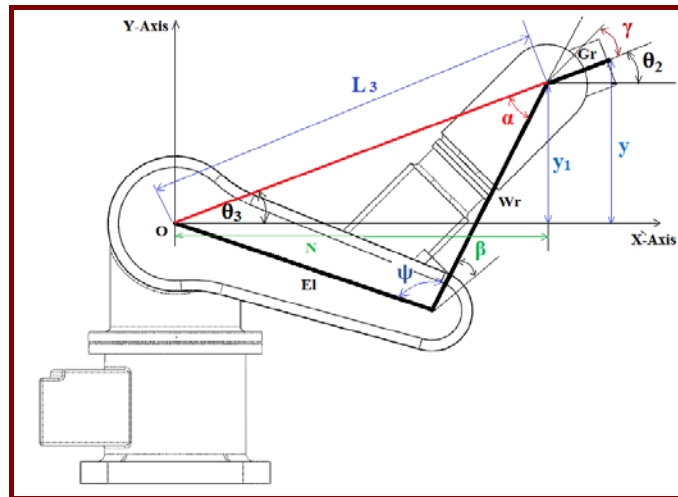


Рисунок 35. Вид спереди нижнего локтя для 3-DOF (RRP).

1- Когда $(x1 > 0)$ и $(z1 \geq 0)$, тогда: $\phi = -\phi_2$.

2- Когда $(x1 \geq 0)$ и $(z1 < 0)$, тогда: $\phi_2 = \cos^{-1} \left(\frac{x_1}{L_1} \right)$, $\phi = \phi_2$.

3- Когда $(x1 < 0)$ и $(z1 \leq 0)$, тогда: $\phi = 180 - \phi_2$.

4- Когда $(x1 \leq 0)$ и $(z1 > 0)$, тогда: $\phi_2 = \sin^{-1} \left(\frac{z_1}{L_1} \right)$, $\phi = 180 + \phi_2$.

У нас появилась возможность получить разные траектории для достижения требуемой точки, путем управления порядком и расположением поворотных двигателей: первого, второго и т. д. Это было достигнуто для того, чтобы во время различного специфического применения робота, траектория его движения исключала контакт его части с любым другим объектом, существующем в рабочем пространстве манипулятора. Таким образом, все это делает возможным использовать альтернативные и доступные решения для выбора наиболее удобной траектории. Все возможные траектории контроля конечного эффектора робота KUKA представлены в таблице 9.

Таблица 9. Возможные траектории контроля конечного эффектора робота KUKA.

О/П положение концевого эффектора	Порядок поворотного двигателя (ϕ)	Порядок поворотного двигателя (θ)	Порядок поворотного двигателя (ψ)	Порядок поворотного двигателя (γ)
Первая позиция – Верхний локоть	(2) + ϕ	(1) + θ	(3) + ψ	(4) + γ
	(2) + ϕ	(4) + θ	(1) + ψ	(3) + γ
	(3) + ϕ	(1) + θ	(4) + ψ	(2) + γ
	(3) + ϕ	(4) + θ	(2) + ψ	(1) + γ
	(2) + ϕ -360	(1) + θ	(3) + ψ	(4) + γ
	(2) + ϕ -360	(4) + θ	(1) + ψ	(3) + γ
	(3) + ϕ -360	(1) + θ	(4) + ψ	(2) + γ
	(3) + ϕ -360	(4) + θ	(2) + ψ	(1) + γ
Вторая позиция – Нижний локоть	(2) + ϕ	(1) + θ	(3) + ψ	(4) + γ
	(2) + ϕ	(4) + θ	(1) + ψ	(3) + γ
	(3) + ϕ	(1) + θ	(4) + ψ	(2) + γ
	(3) + ϕ	(4) + θ	(2) + ψ	(1) + γ
	(2) + ϕ -360	(1) + θ	(3) + ψ	(4) + γ
	(2) + ϕ -360	(4) + θ	(1) + ψ	(3) + γ
	(3) + ϕ -360	(1) + θ	(4) + ψ	(2) + γ
	(3) + ϕ -360	(4) + θ	(2) + ψ	(1) + γ

Тематическое исследование

В этом исследовании мы использовали входные параметры робота-манипулятора 4-DOF, представленные в Таблице 10.

Размеры манипулятора (мм)	X	Y	Z
Локоть = 500	$X_i = 567.5$	$Y_i = 645$	$Z_i = 0$
Запястье = 468.03			
Держатель инструмента = 122.5	$X_f = -600$	$Y_f = 300$	$Z_f = 700$

Таблица 10: Входные параметры программы обратной кинематики и управления KUKA Robot.

Начальная позиция KUKA 4R показана на рисунке 36.

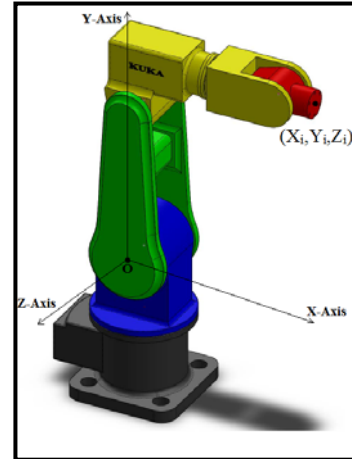


Рисунок 36. Начальная позиция KUKA 4R.

Результаты программы с входными и выходными данными представлены в таблице 11.

О/П положение концевого эффектора	Номер графика траекто- рии	Порядок степени (ϕ)	Порядок степени (θ)	Порядок поворотного двигателя (ψ)	Порядок поворотного двигателя (γ)	Длина траектории (мм)
Первая позиция – Верхний локоть	6	(2) 229.4	(1) -44.1	(3) 14	(4) 48.1	4347.0
	9	(2) 229.4	(4) -44.1	(1) 14	(3) 48.1	4729.1
	2	(3) 229.4	(1) -44.1	(4) 14	(2) 48.1	4529.8
	13	(3) 229.4	(4) -44.1	(2) 14	(1) 48.1	4871.8
	5	(2) -130.6	(1) -44.1	(3) 14	(4) 48.1	2865.5
	15	(2) -130.6	(4) -44.1	(1) 14	(3) 48.1	3119.7
	7	(3) -130.6	(1) -44.1	(4) 14	(2) 48.1	2968.7
	10	(3) -130.6	(4) -44.1	(2) 14	(1) 48.1	3200.0
Вторая позиция – Нижний локоть	1	(2) 229.4	(1) -99.9	(3) 129.9	(4) -12	6291.2
	12	(2) 229.4	(4) -99.9	(1) 129.9	(3) -12	6916.4
	3	(3) 229.4	(1) -99.9	(4) 129.9	(2) -12	6189.4
	11	(3) 229.4	(4) -99.9	(2) 129.9	(1) -12	6906.7
	8	(2) -130.6	(1) -99.9	(3) 129.9	(4) -12	4809.8
	16	(2) -130.6	(4) -99.9	(1) 129.9	(3) -12	5248.6
	4	(3) -130.6	(1) -99.9	(4) 129.9	(2) -12	4743.7
	14	(3) -130.6	(4) -99.9	(2) 129.9	(1) -12	5234.9

Таблица 11. Результаты вывода программы обратной кинематики и управления KUKA Robot.

Окончательное положение верхнего и нижнего колена с одинаковым уклоном изометрического и переднего вида для KUKA 4R показано ниже на рисунке 37.

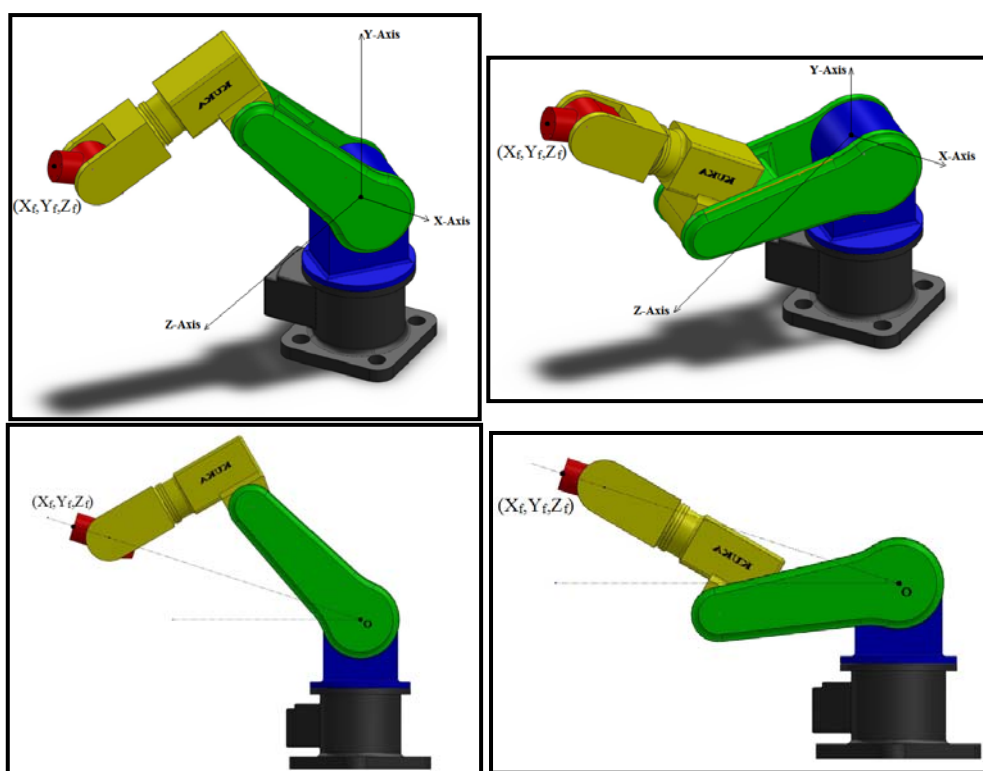


Рисунок 37. Окончательное положение верхнего и нижнего колена с одинаковым уклоном изометрического и переднего вида для KUKA 4R.

Анализ результатов

Используя программу обратной кинематики и управления роботом KUKA, мы можем контролировать порядок и расположение вращающихся двигателей. Поэтому мы получаем 16 возможных траекторий конечного эффектора при переходе от одной точки к другой, как показано на рисунках в данном разделе диссертационного исследования. Мы можем выбрать оптимальную траекторию, выбрав минимальное значение таких параметров, как длина траектории, рабочее время, использованная энергия. Нас интересовал параметр «длина траектории» - мы выбрали две оптимальные траектории:

- 1- Первая оптимальная траектория номер 5 с длиной пути 2865.5 мм.
2. Вторая оптимальная траектория - номер 7 с длиной пути 2968.7 мм.

Выводы по главе 2

1. Нами был разработан новый метод прямой и обратной кинематики для 3DOF робота-манипулятора. Решение задач обратной кинематики было осуществлено с помощью развитых геометрических методов.

2. Моделирование суставов движения робота при помощи программного комплекса SolidWorks. Вычислительная сложность этого метода является относительно низкой, метод подходит для управления в реальном времени роботами-манипуляторами в промышленных отраслях.

3. Эта программа может быть использована для поиска всех возможных решений этой проблемы и экономии времени, которое занимают расчеты. Данное программное обеспечение было написано на языке программирования LabVIEW.

4. Метод был разработан для вычисления обратной кинематики и контролирования траектории SCARA робота-манипулятора с помощью LabVIEW SoftMotion и SolidWorks.

5. Это исследование было сделано с использованием нового графического метода представления для вычисления обратных задач кинематики с очень точным результатом, позволяющее экономить время на математических расчетах. Метод удобен для использования конструкторами и инженерами в области машиностроения.

6. Преимущества данной работы:

- 1) Проектирование и исследование обратной кинематики трех степеней свободы в виде вращательно-призматических шарниров 3-DOF (RRP) робота-манипулятора (таких, как существуют в SCARA Robot).
- 2) Управление траекториями концевых эффекторов, и моделирование их через LabVIEW, используя модуль NI-SoftMotion в качестве регулятора.

ГЛАВА 3. Исследование динамики управления манипулятором робота

3.1 Управление и исследование динамики робота-манипулятора с использованием программных пакетов LabVIEW и SolidWorks

Динамика – это изучение движения в ответ на внешние нагрузки. Законы движения Ньютона определяют динамические характеристики механизма. Кинематическая цепь представляет собой ряд звеньев, соединенных кинематическими парами. Цепь называется замкнутой цепью, если каждое звено соединено по крайней мере с двумя другими звеньями, в противном случае она называется разомкнутой цепью.

Кинематическая модель в стандартной форме (1), описывающая движения робота [31]

$$A_p = {}^A_B T B_p \quad (1)$$

где вектор P – вектор обобщенных координат, позволяющих определить положение и конфигурацию робота-манипулятора, T – это преобразование матрицы из кадра $\{B\}$ в другой кадр $\{A\}$.

- Динамическая модель, описывающая, как крутящий момент, создаваемый приводами, влияет на движение робота-манипулятора:

$$T_k = \sum_{i=1}^n m_i g d_i \quad (2)$$

где T – крутящий момент, определяемый приводом, d – перпендикулярное расстояние между центром тяжести тела и шарниром k , которое определяется крутящим моментом [54].

- Модель привода, которая соединяет силу двигателя с крутящим моментом, произведенным приводами.

$$P_k = T_k \omega_k \quad (3)$$

Динамика и управление CAD-моделью с помощью программ SolidWorks и LabVIEW

Ранее в главе 2 была решена обратная кинематическая задача для ряда моделей роботов-манипуляторов. Аналогичным образом решим задачу управления динамикой промышленного манипулятора.

Как и ранее, воспользуемся связкой между SOLIDWORKS и LabVIEW с

использованием модуля SoftMotion в качестве контроллера.

LabVIEW работает как мастер, потому что LabVIEW имеет общий контроль над системой, получает входные данные и т. Д. Выходные данные могут быть получены как из SolidWorks, так и из LabVIEW.

Оси LabVIEW NISoftMotion, которые также добавляются в менеджер проекта, как показано на рисунке 36, затем приводят в действие двигатели, определенные в сборке SolidWorks [17].

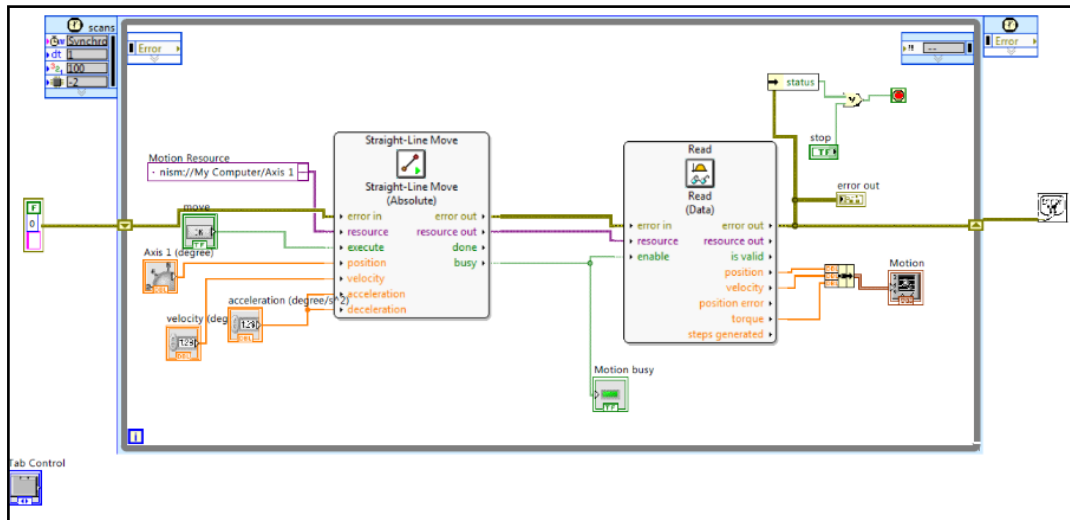


Рисунок 38. Основная программа для управления одной осью CAD-модели.

Части блок-схемы (Рисунок 28) опишем следующим образом:

Временная петля - для управления моделью.

Линия - функция, найденная в палитре «Видение и движение», используется в качестве команды движения в CAD-модели.

Чтение данных - функция, которая получает данные из строки и переводит их в выходные результаты.

Движение - индикатор, показывающий результаты выхода в виде графиков, таблиц и т. д.

Ресурс - оси электродвигателя SolidWorks действует как ввод ресурса.

Выполнение и положение - элементы управления для ввода функции «перемещения линии».

Готово - индикатор, показывающий завершения движения.

Движение занято - индикатор, показывающий ход процесса перемещения.

Остановка – выход из цикла и остановка управления движения.

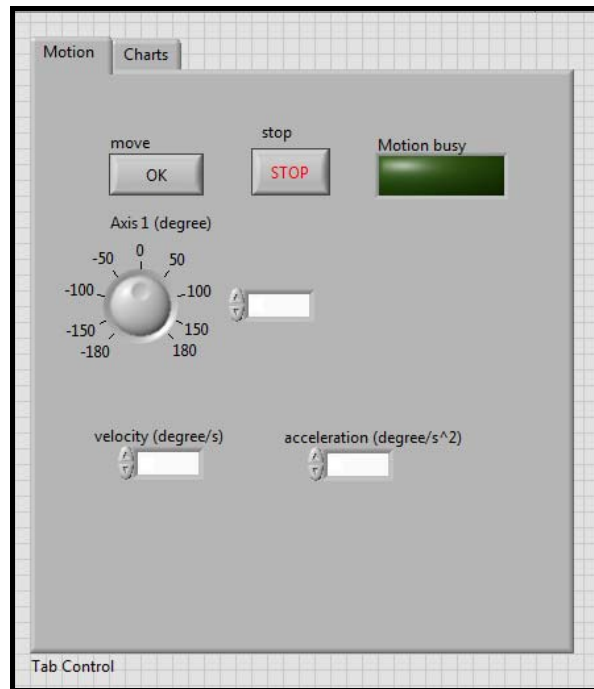


Рисунок 39. Интерфейс программы для управления поворотным двигателем САД-МОДЕЛИ.

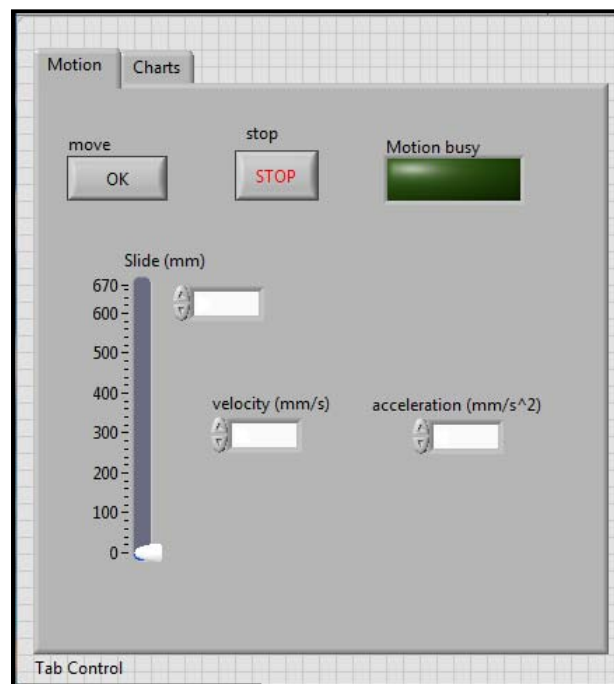


Рисунок 40. Интерфейс программы для управления линейным двигателем САД-МОДЕЛИ.



Диаграмма 5. Алгоритм управления, проектирования и расчета мощности двигателя / привода для манипулятора.

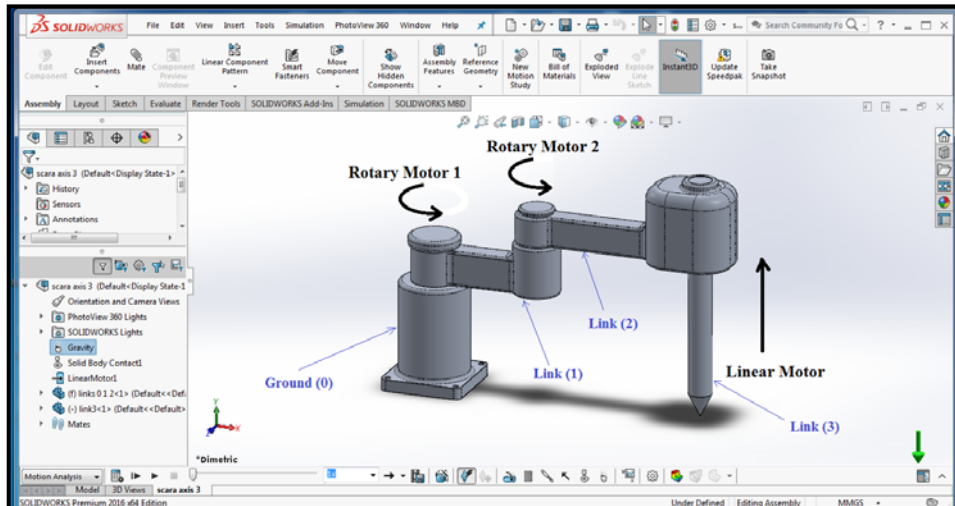


Рисунок 41. Изометрическая проекция робота SCARA с тремя движущимися осями.

В данном исследовании [17] выбрали материал манипулятора SCARA, представленного на Рисунке 41 – алюминиевый сплав 1060, с плотностью 2700 кг/м^3 . Общая массой манипулятора равна 261.62 кг , его технические характеристики приведены в Таблице 12:

Ссылка (i)	Масса (кг)
База (0)	100.68
Часть (1)	42.03
Часть (2)	99.14
Часть (3)	20.45

Таблица 12. Измеренные массы SCARA робота.

- 1- Трехосевые рычаги с двумя поворотными шарнирами и одним линейным шарниром.
- 2 - Добавлено влияние силы тяжести $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ с направлением вниз.
- 3- добавлен эффект фрикционного контакта каждыми двумя движущимися частями, добавлен эффект сухого контакта алюминия с использованием статического коэффициента трения $\mu_s = 0.25$ и динамического коэффициента трения $\mu_d = 0.2$.
- 4 - Добавлена единая скорость вращения двигателя = 60 градусов в секунду.
- 5 - Добавлена единая скорость линейного двигателя = 600 мм/сек .

A- Ось 1 (поворотный двигатель 1)

Это вращающееся соединение (1), расположенное между частью (0) и частью (1), и при перемещении поворотного двигателя (1) от начального угла = 0 градусов до конечного угла = 180 градусов (см. Рисунок 42) результаты получены следующие (см. Рисунок 43).

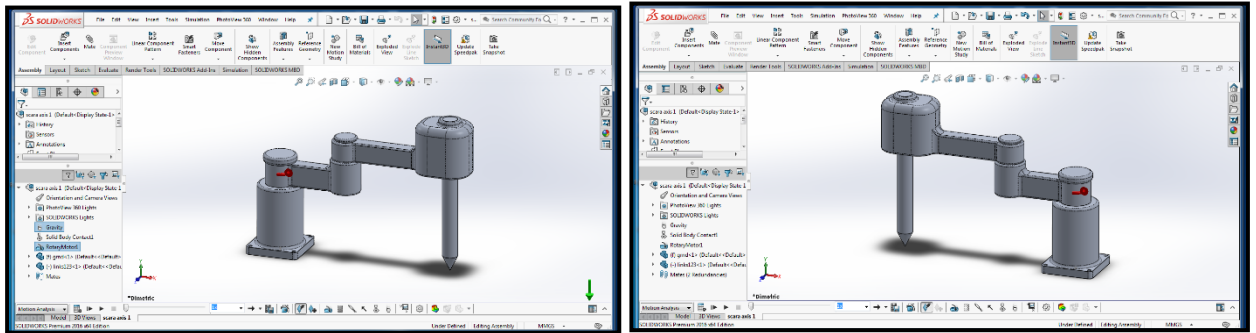


Рисунок 42. Поворотный двигатель (1) под начальным углом = 0 градусов и под конечным углом = 180 градусов.

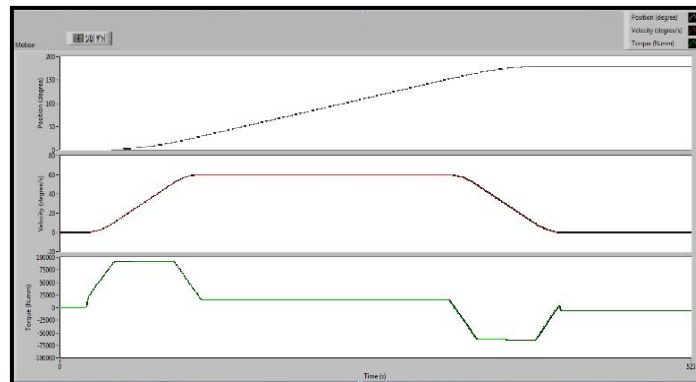


Рисунок 43. Результаты для поворотного двигателя (1): положение, скорость и крутящий момент.

Исходя из этих результатов, с помощью конверторной программы можно вычислить максимальную мощность, которая необходима для поворотного двигателя (1), см. на Рисунке 44.

Power or watts For Motor Selection	
RPM	0
Watt or Power	0
Torque (N.m)	0
Newton/mm to Newton/m	
N.mm	N.m
0	0
RPM to velocity convertor	
RPM	deg/s
0	0
STOP	

Power or watts For Motor Selection	
RPM	10
Watt or Power	97.0068
Torque (N.m)	92.6347
Newton/mm to Newton/m	
N.mm	N.m
92634.7	92.6347
RPM to velocity convertor	
RPM	deg/s
10	60
STOP	

Рисунок 44. Конверторная программа для вычисления и расчета необходимой мощности для поворотного двигателя (1).

Исходя из этих результатов, мы выберем поворотный привод/ электродвигатель (1) с мощностью = 97.0068 Вт.

В- Ось 2 (поворотный двигатель 2)

Это вращающееся соединение (2), расположенное между частью (1) и частью (2), и при перемещении поворотного двигателя (2) от начального угла = 0 градусов до конечного угла = 180 градусов (см. Рисунок 45) результаты получены следующие (см. Рисунок 46).

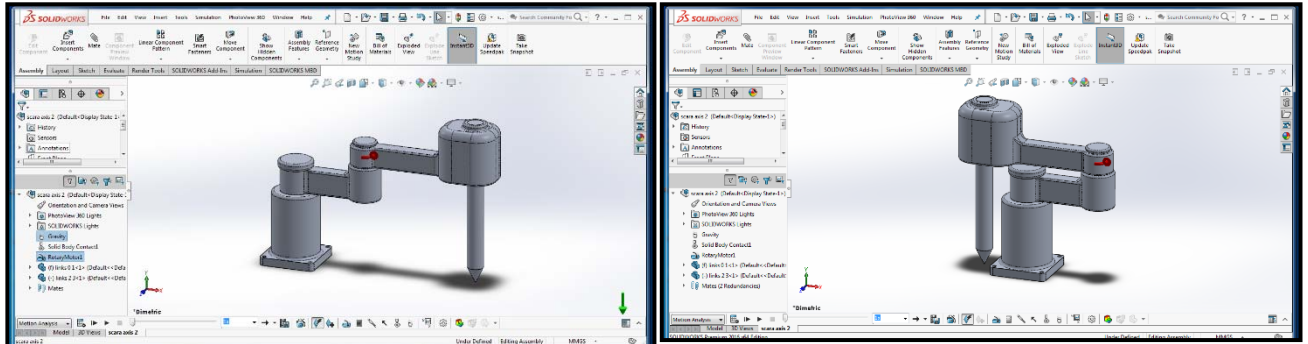


Рисунок 45. Поворотный двигатель (2) под начальным углом = 0 градусов и под конечным углом = 180 градусов.

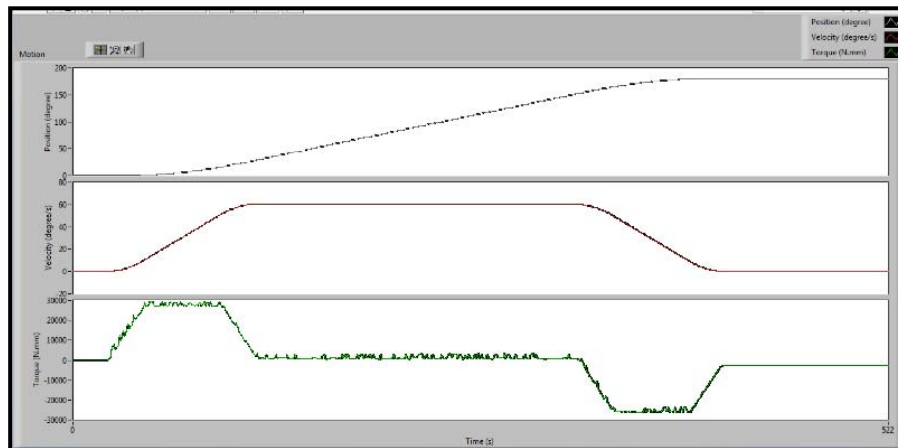


Рисунок 46. Результаты для поворотного двигателя (2): положение, скорость вращения и крутящий момент.

Исходя из этих результатов, мы можем вычислить максимальную мощность, которая необходима для поворотного двигателя (2), см. Рисунок 47.

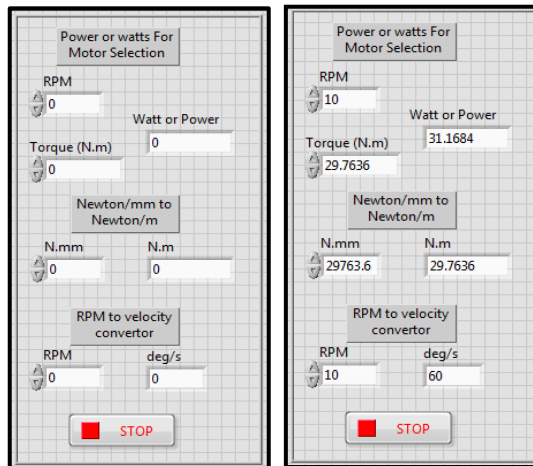


Рисунок 47. Конверторная программа для вычисления и расчета требуемой мощности для поворотного двигателя (2).

Из этого результата, выбираем поворотный привод/ электродвигатель (2) с мощностью = 31.2 Вт.

C- Ось 3 (линейный двигатель)

Это призматическое соединение (3), расположенное между частью (2) и частью (3), и при перемещении линейного двигателя из исходного положения = 0 мм до конечной позиции = 200 мм (как показано на Рисунке 48) результаты получены следующие (см. Рисунок 49).

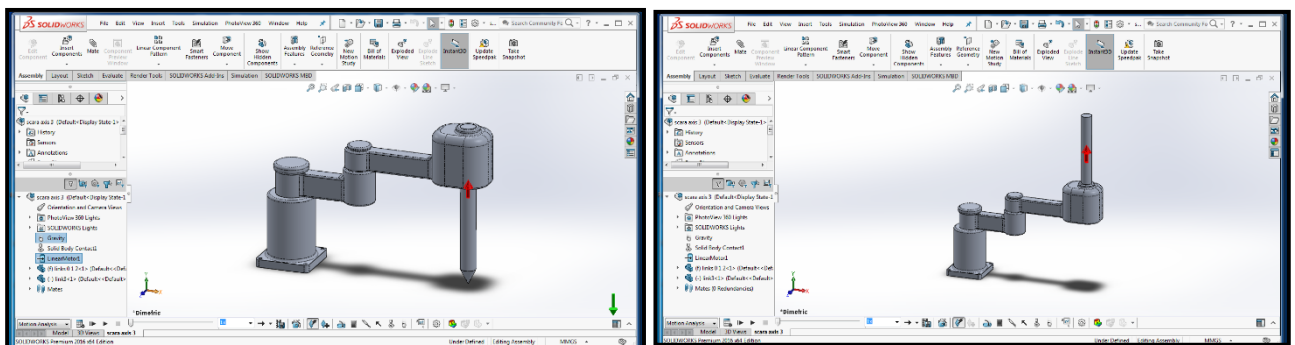


Рисунок 48. Линейный двигатель при первоначальном положении = 0 мм и при окончательном положении = 670 мм.

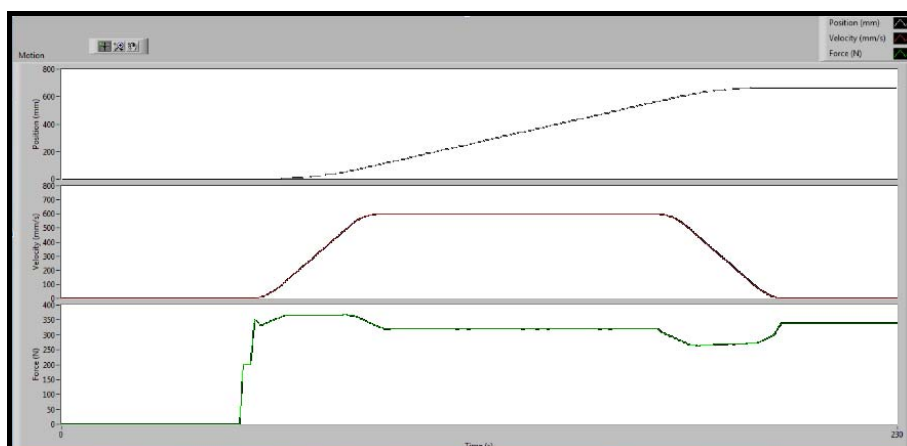


Рисунок 49. Результаты для линейного двигателя: положение, скорость и сила.

Исходя из этих результатов, мы можем вычислить максимальную мощность, которая необходима для линейного мотора с помощью конверторной программы, как показано на Рисунке 50.

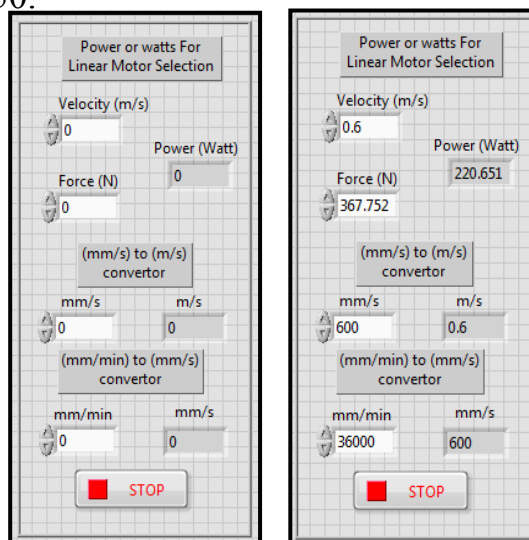


Рисунок 50. Конверторная программа для вычисления и расчета требуемой мощности для линейного электродвигателя.

Исходя из полученного результата, выбираем линейный привод/ мотор мощностью = 220.561 ватт.

3.2 Разработка системы управления манипуляторами роботом-манипулятором PUMA 560, работающим на солнечных батареях

Роботы – манипуляторы могут применяться не только на фиксированной базе, но и могут быть установлены на перемещающейся тележке. Задачи, решаемые таким роботом могут быть разнообразны, применительно к пищевому производству это может быть задача паллетирования готовой продукции, например поддонов с бутылками. Мобильных роботов остро встаёт вопрос энергоснабжения, которое в общем случае может быть ограничен мощностью аккумуляторов или систем подвода энергии, например при помощи солнечных батарей.

Динамическое исследование робота PUMA 560

PUMA 560 - роботизированный манипулятор, разработанный фирмой Unimate, более 25 лет назад, и широко распространившийся благодаря своей функциональности. Это управляемый манипулятор, предназначенный для использования в промышленности, имеющий шесть вращающихся суставов /степень свободы (DOF) с тремя основными осями перемещения (X, Y и Z); по

функциональности он напоминает руку человека. Серводвигатель постоянного тока приводит в действие каждое из соединений робота [29].

Требуемое положение концевой эффектора, который обычно представляет собой устройство, закрепленное на конце роботизированной руки, достигается путем координации первых трех суставов, которые называются: колонна (сустав 1), плечо (сустав 2) и локоть (сустав 3). Эти суставы позволяют роботу перемещать концевой эффектор в любое положение с максимальным радиусом действия 1 м. Ориентация концевой эффектора важна, когда он приближается к своему конечному положению, и это достигается с помощью трех запястных соединений (4, 5 и 6), где инструмент можно независимо маневрировать. Это дает роботу шесть степеней свободы, показанных на рисунке 51. На рисунке дано название каждого сустава и максимальный диапазон его вращения [109].

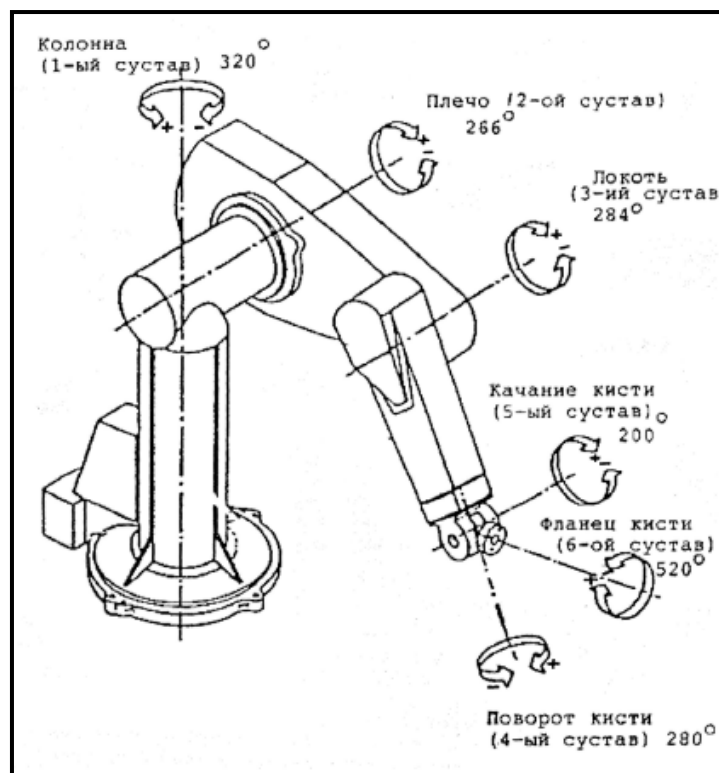


Рисунок 51. Степени подвижности манипулятора PUMA 560 [109].

Первые три сустава (колонна, плечо и локоть) оснащены электромагнитными тормозами, которые блокируют электродвигатели для предотвращения коллапса при отключении питания двигателя [92].

PUMA 560 с солнечными батареями

- 1- В этом исследовании [16] манипулятор PUMA 560 был изготовлен из сплава алюминия 1060 с плотностью 2700 кг/м^3 . В Таблице 13 представлена информация по измеренным массам PUMA 560:

Таблица 13. Измеренные массы PUMA 560.

Название элемента	Масса (кг)
База.	42.32
Колонна. Сустав 1.	11.972
Плечо. Сустав 2.	45.486
Локоть. Сустав 3.	12.357
Поворот кисти. Сустав 4.	1.339
Качание кисти. Сустав 5.	0.1763
Фланец кисти. Сустав 6.	0.0316

- 2- Все осевые рычаги с поворотными суставами.
 3- Добавлен эффект силы тяжести $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ с движением вниз.
 4- Добавлен эффект фрикционного контакта между каждыми двумя подвижными частями, мы добавили эффект сухого контакта алюминия с использованием статического коэффициента трения $\mu_s = 0.25$ и динамического коэффициента трения $\mu_d = 0.2$

Добавлена равномерная скорость вращения поворотного двигателя = 60 градусов в секунду (10 об / мин).

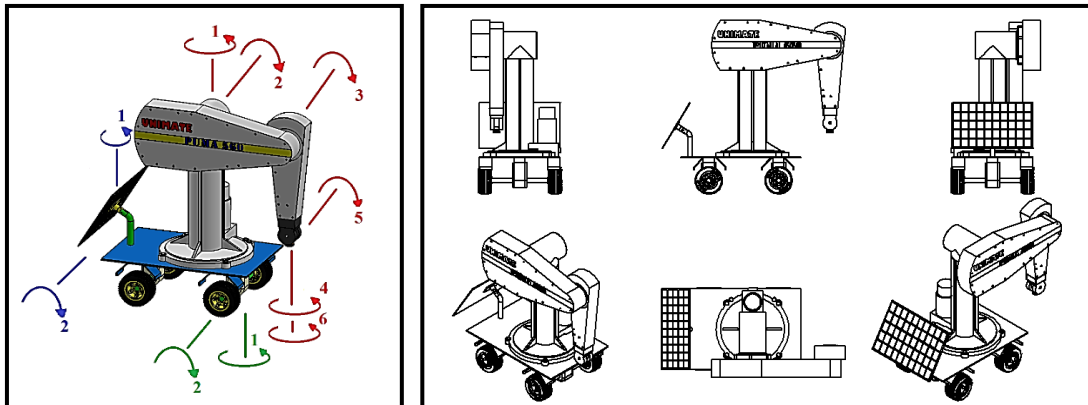


Рисунок 52. Разработка степеней свободы робота-манипулятора PUMA 560 (10 осей вращения). Виды.

Соединение SOLIDWORKS и LabVIEW было выполнено модулем NI SoftMotion в качестве контроллера.

LabVIEW работает как мастер, потому что LabVIEW имеет общее управление системой получения входов, выходов и т.д. Выходные данные могут быть получены как из SOLIDWORKS, так и из LabVIEW, как показано на Рисунках 53 и 54.

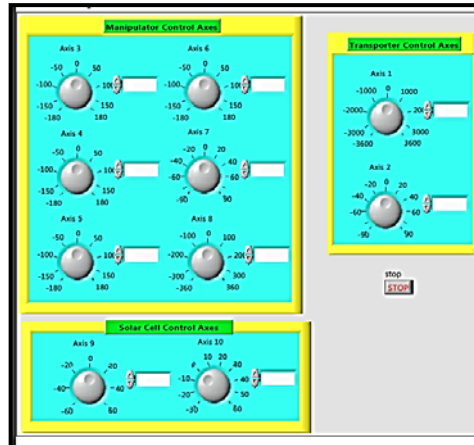


Рисунок 53. Интерфейс программы управления манипулятором, солнечной батареей и транспортером осей.

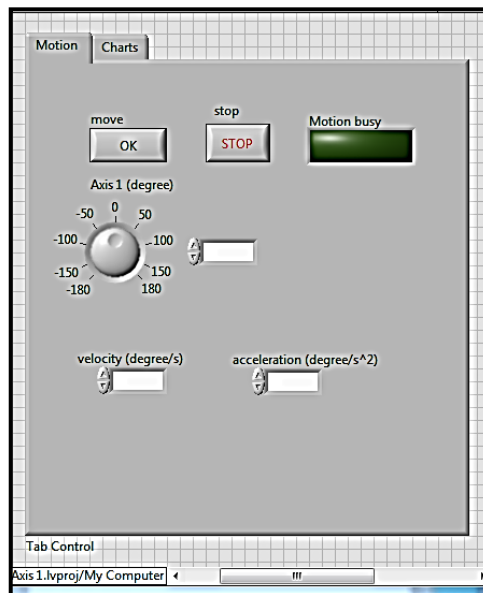


Рисунок 54. Интерфейс программы для управления роторным двигателем модели Cad.

LabVIEW и Solidworks совместно нашли решение этой проблемы с помощью набора инструментов SoftMotion, который собирает данные из Solidworks и интерпретирует в LabVIEW: найти время и подходящий крутящий момент, необходимый для перемещения по определенной оси.

Таким образом, мы можем создать интерфейс LabVIEW и SolidWorks для определения фактического крутящего момента для различных роботов и механизмов.

План исследования [16]:

1- манипулятор PUMA 560:

Ось 1 (поворотный двигатель 1)

Этот вращающийся сустав (1), расположенный между основанием и колонной и перемещающий поворотный двигатель (1) от начального угла = 0 градусов до конечного угла = 180 градусов, как показано на Рисунке 55.

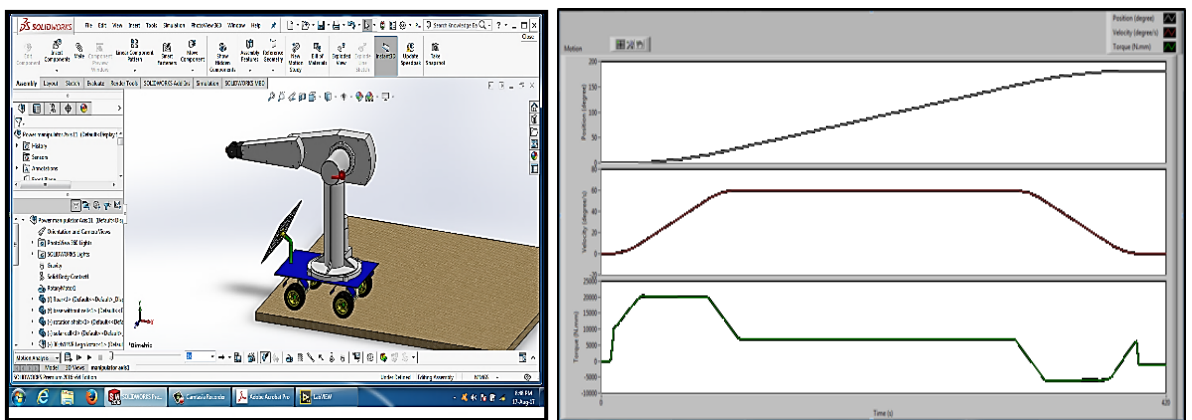


Рисунок 55. Поворотный двигатель (1): положение, скорость вращения и крутящий момент при движении от 0° до 180° .

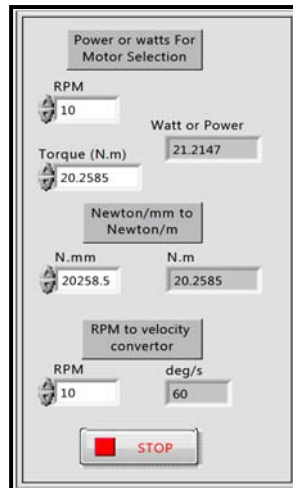


Рисунок 56. Конверторная программа расчета мощности, необходимой для поворотного двигателя (1).

Исходя из полученных результатов, мы можем вычислить максимальную мощность, потребляемую поворотным двигателем (1), с помощью конверторной программы, интерфейс которой показан на Рисунке 56.

A- Ось 2 (роторный двигатель 2)

Это вращающийся сустав (2), расположенный между колонной и плечом и перемещающий поворотный двигатель (2) от начального угла = 0 градусов до окончательного угла = 180 градусов, как показано на Рисунке 57.

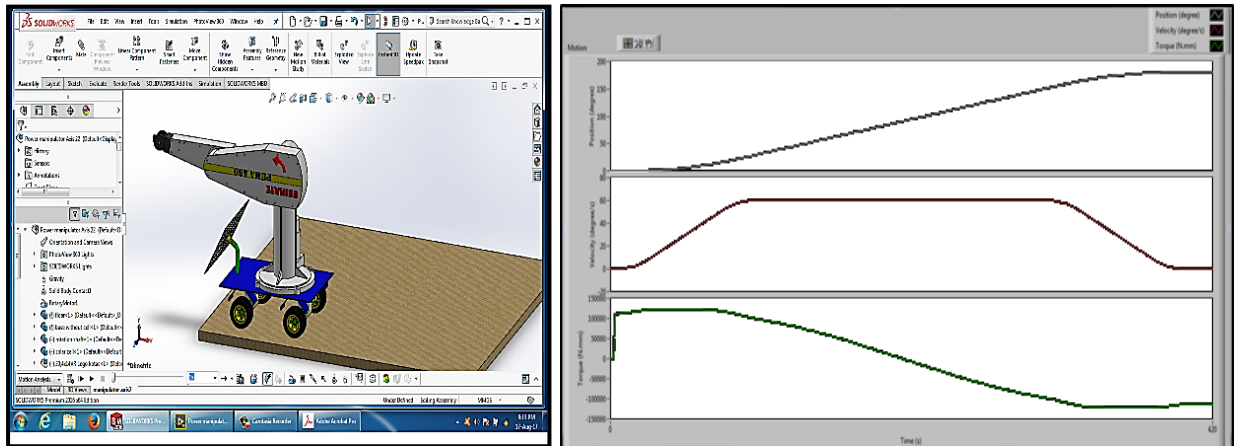


Рисунок 57. Поворотный двигатель (2): положение, скорость вращения и крутящий момент при движении от 0° до 180°.

Power or watts For Motor Selection	
RPM	10
Watt or Power	127.97
Torque (N.m)	122.202
Newton/mm to Newton/m	
N.mm	122202
N.m	122.202
RPM to velocity convertor	
RPM	10
deg/s	60
STOP	

Рисунок 58. Конверторная программа расчета мощности, необходимой для поворотного двигателя (2).

Исходя из полученных результатов, мы можем вычислить максимальную мощность, которая необходима для поворотного двигателя (2), с помощью конверторной программы, интерфейс которой показан на Рисунке 58.

B- Ось 3 (роторный Мотор 3)

Это вращающийся сустав (3), расположенный между плечом и коленом и перемещающий поворотный двигатель (3) от начального угла = 0 градусов до окончательного угла = 180 градусов, как показано на Рисунке 59.

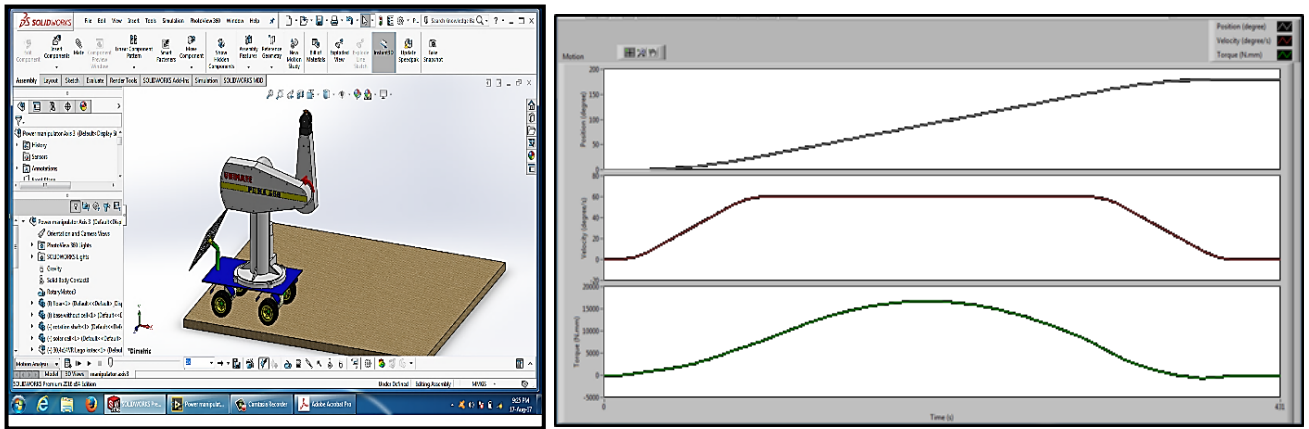


Рисунок 59. Поворотный двигатель (3): положение, скорость вращения и крутящий момент при движении от 0° до 180° .

Рисунок 60. Конверторная программа расчета мощности, необходимой для поворотного двигателя (3).

Исходя из полученных результатов, мы можем вычислить максимальную мощность, которая необходима для поворотного двигателя (3), с помощью конверторной программы, интерфейс которой показан на Рисунке 60.

С- Ось 4 (роторный Мотор 4)

Это вращающийся сустав (4), расположенный между коленом и поворотом кисти (суставом 4) и перемещающий поворотный двигатель (4) от начального угла = 0 градусов до окончательного угла = 360 градусов, как показано на Рисунке 61.

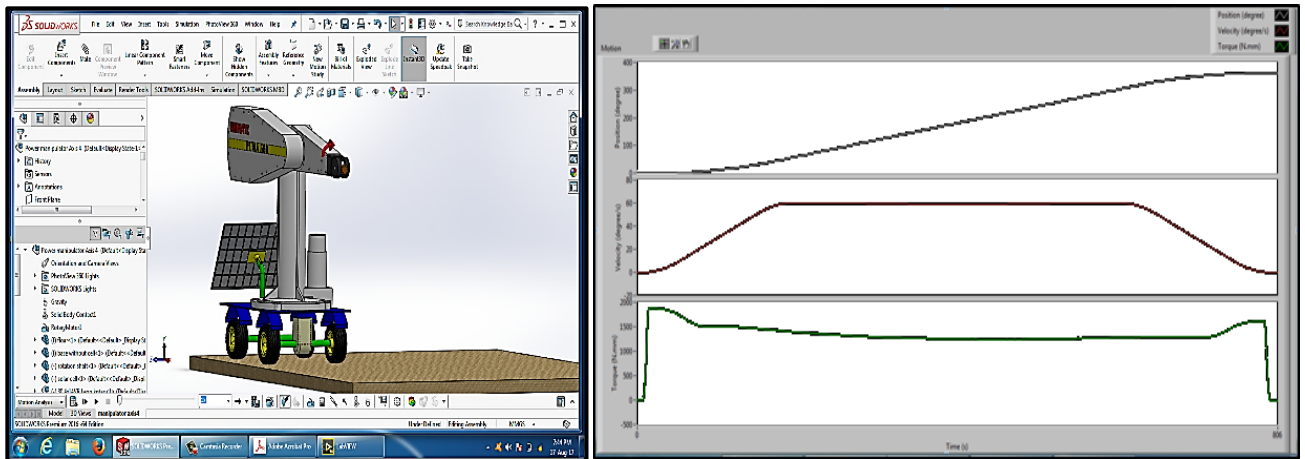


Рисунок 61. Поворотный двигатель (4): положение, скорость вращения и крутящий момент при движении от 0° до 180° .

Рисунок 62. Конверторная программа расчета мощности, необходимой для поворотного двигателя (4).

Исходя из полученных результатов, мы можем вычислить максимальную мощность, которая необходима для поворотного двигателя (4) с помощью программы, интерфейс которой показан на Рисунке 62.

D- Ось 5 (Поворотный двигатель 5)

Это вращающийся сустав (5), расположенный между поворотом кисти (суставом 4) и качанием кисти (суставом 5) и перемещающий поворотный двигатель (5) от начального угла = 0 градусов до окончательного угла = 180 градусов, как показано на Рисунок 63.

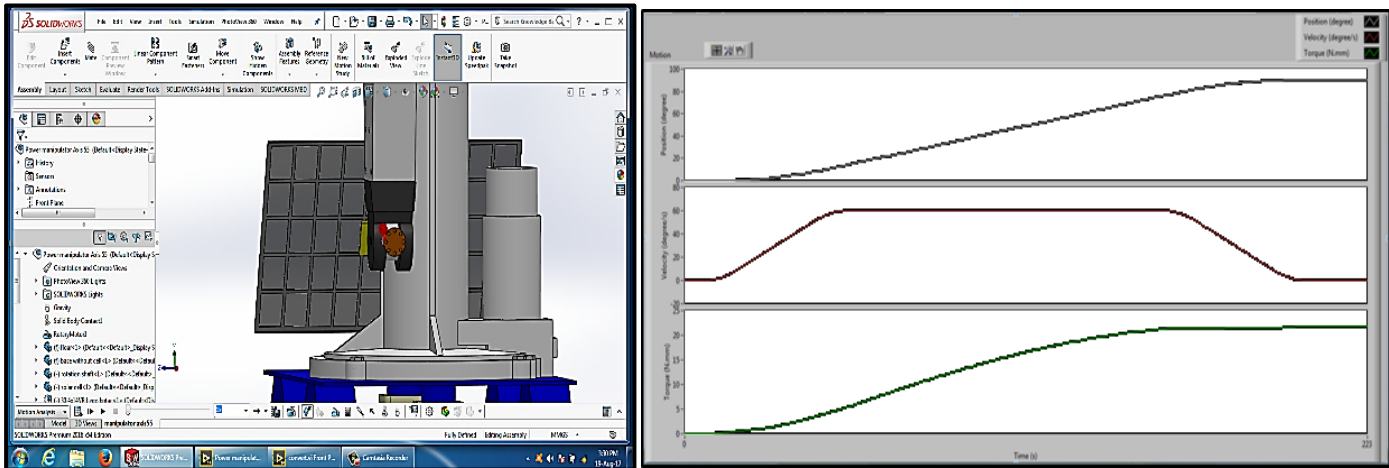


Рисунок 63. Поворотный двигатель (5): положение, скорость вращения и крутящий момент при движении от 0° до 180° .

Рисунок 64. Конверторная программа расчета мощности, необходимой для поворотного двигателя (5).

Исходя из полученных результатов, мы можем вычислить максимальную мощность, которая необходима для поворотного двигателя (5), с помощью конверторной программы, как показано на Рисунке 64.

Е- Ось 6 (роторный Мотор 6)

Это вращающийся сустав (6), расположенный между качанием кисти (суставом 5) и фланцем кисти (суставом 6) и перемещающий поворотный двигатель (6) от начального угла = 0 градусов до окончательного угла = 360 градусов, как показано на Рисунке 65.

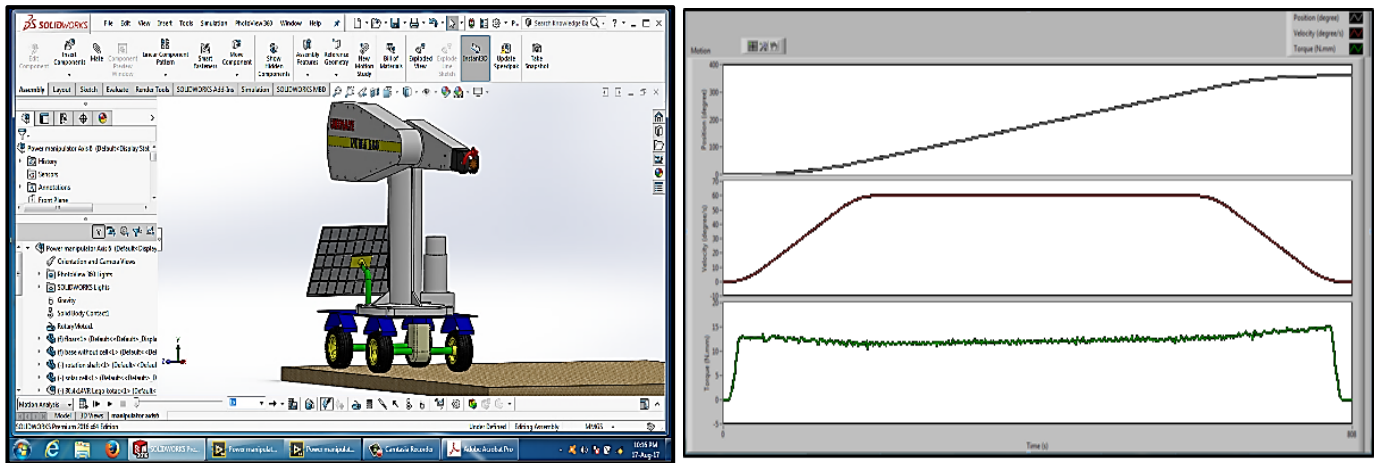


Рисунок 65. Поворотный двигатель (6): положение, скорость вращения и крутящий момент при движении от 0° до 360° .

Рисунок 66. Конверторная программа расчета мощности, необходимой для поворотного двигателя(6).

Исходя из этих результатов, мы можем вычислить максимальную мощность, которая необходима для поворотного двигателя (6), с помощью конверторной программы, интерфейс которой показан на Рисунке 66.

2- на солнечных батареях:

А- Ось 1 (Поворотный двигатель 1)

Это вращающийся сустав (1), расположенный между основанием транспортера и вертикальным стержнем, на котором установлен солнечный элемент, и перемещающий поворотный двигатель (1) от начального угла = 0 градусов до окончательного угла = 90 градусов, как показано на Рисунок 67.

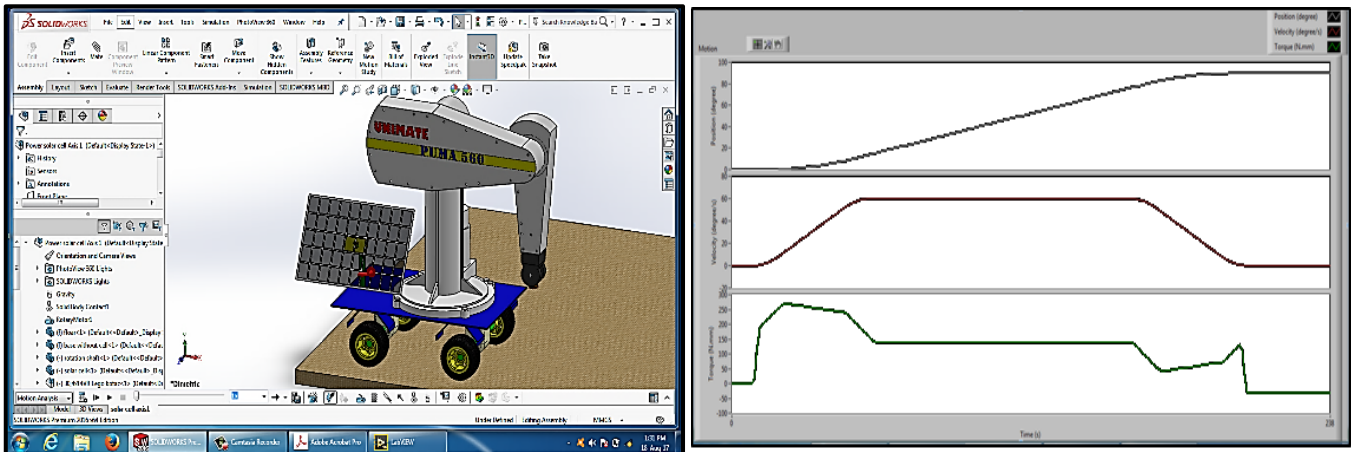


Рисунок 67. Поворотный двигатель (1): положение, скорость вращения и крутящий момент при движении от 0° до 90° .

Рисунок 68. Конверторная программа расчета мощности, необходимой для поворотного двигателя (1).

Исходя из полученных результатов, мы можем вычислить максимальную мощность, которая необходима для поворотного двигателя (1), с помощью конверторной программы, интерфейс которой показан на Рисунке 68.

В- Ось 2 (поворотный двигатель 2)

Это вращающийся сустав (2), расположенный между вертикальным стержнем, на котором установлена солнечная батарея, и солнечной батареей, и перемещающий поворотный двигатель (2) от начального угла = 0 градусов до окончательного угла = 60 градусов, как показано на Рисунок 69.

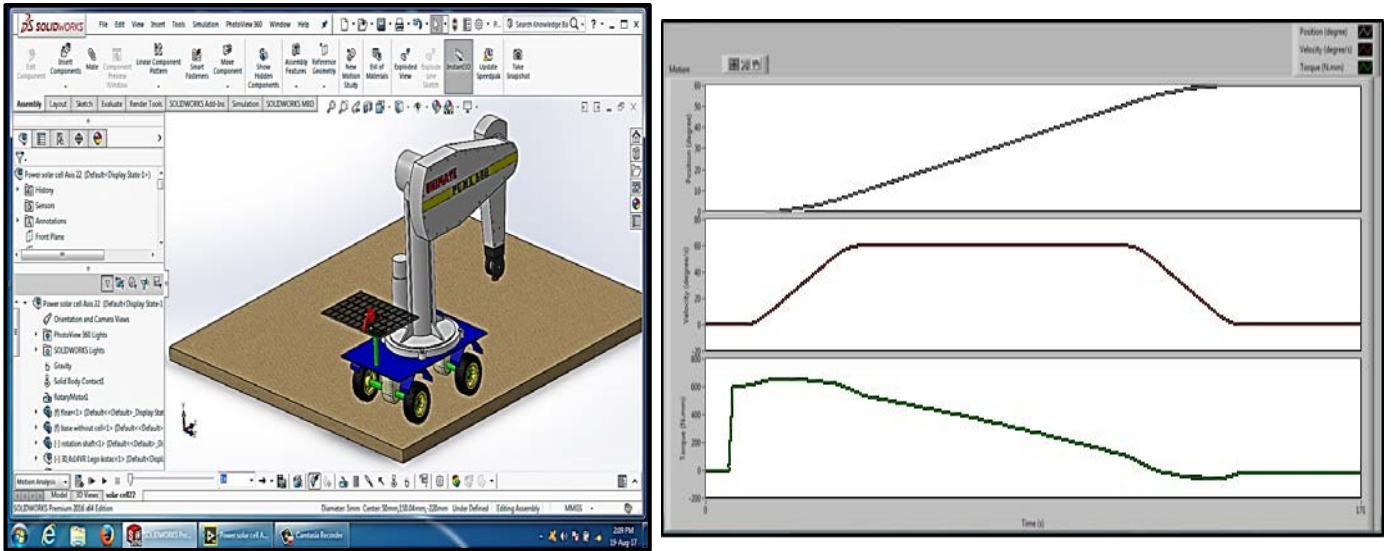


Рисунок 69. Поворотный двигатель (2): положение, скорость вращения и крутящий момент при движении от 0° до 60° .

Рисунок 70. Конверторная программа расчет мощности, необходимой для поворотного двигателя (2).

Исходя из полученных результатов, мы можем вычислить максимальную мощность, которая необходима для поворотного двигателя (2), с помощью конверторной программы, интерфейс которой показан на Рисунке 70.

3- Транспортёр:

Используя транспортёр, на котором установлены манипулятор PUMA 560 и солнечная батарея с двумя поворотными двигателями, один из которых предназначен для перемещения системы вперед и назад, а другой - для поворота влево и вправо, эту систему можно перемещать и поворачивать так, чтобы мы могли получить большое рабочее пространство для манипулятора PUMA 560.

Источник питания солнечных батарей

Из приведенных выше результатов мы выберем солнечный элемент, который будет производить мощность и энергию для манипулятора и солнечных батарей двигателей так:

Общая необходимая мощность= сумме мощности двигателей для манипулятора = 170 Вт.

Выводы по главе 3

1. Целью данной работы является разработка Cad-моделей различных робототехнических средств и их динамическое моделирование с помощью LabVIEW с использованием модуля NISoftMotion.

2. Разработанное программой руководство обосновывает зависимость выбора двигателя от расчета требуемой мощности.

3. Дано графическое описание результатов динамического процесса манипулятора робота. Расчет крутящего момента позволяет определить мощность и время установки на режим.

4. Практически обоснован выбор зависимостей для нахождения требуемой мощности двигателя, расчета крутящего момента на каждом шарнире манипулятора и получения решения с помощью инструментария NI-SoftMotion, который собирает данные из SolidWorks и интерпретирует полученные данные в LabVIEW.

5. Полученное упрощенное решение для мехатронных или механических машин предполагает использование двигателя для работы, в таких случаях сложно подобрать подходящий двигатель для новой конструкции. В основном мотор выбирается после изготовления машины.

6. Показана взаимосвязь между параметрами работы динамического моделирования робота-манипулятора и мощностью двигателя, требуемой при расчете крутящего момента.

7. Возможно усовершенствование роботизированного манипулятора PUMA 560, добавление в него мобильной тележки, солнечных батарей (аккумуляторов, иных беспроводных систем передачи энергии) и видеокамеры, что позволит

роботу перемещаться по пространству и расширить его сферу применения.

8. Для моделирования движения робота используется SolidWork, который получает сигналы от управляющей программы, созданной в среде LabVIEW, и имитирует движение каретки конвейера и манипулятора. Программа в среде LabVIEW получает координаты и формирует управляющие сигналы, обеспечивающие движение всех звеньев и контролирующие суммарную максимальную мощность двигателей, что позволяет роботу выполнять сложные задачи и повышает его производительность.

9. Предложенная система управления роботом-манипулятором PUMA 560 может быть использована для выполнения многих технологических задач в пищевой промышленности, например при паллетировании или складских работах.

ГЛАВА 4. Экспериментальное исследование

4.1 Экспериментальное исследование системы отслеживания цветных объектов с использованием технического зрения

В современных технологических процессах, особенно – с контролем качества, которые являются одним из решающих факторов конкурентоспособности отрасли в целом, существует острая потребность в усовершенствованном роботизированном обнаружении и распознавании объектов, захвате объектов и возможности выполнения сборочных операций в неструктурированных средах со случайно расположенными объектами. Роботизированные системы сборки и контроля качества, основанные на машинном зрении, которые были предметом постоянного исследовательского интереса в течение почти четырех десятилетий, теперь, в форме уже компьютерного зрения, стали пригодны для решения самых разнообразных задач.

В настоящее время промышленность часто сосредоточена на производстве мелкосерийных или индивидуальных продуктов. В такой экономике потребность гораздо больше зависит от простоты использования, более высокой степени адаптации, включая сборочные операции и процессы управления в неструктурированных средах с диверсифицированными и произвольно расположенными объектами, которые позволяют выполнять небольшие тиражи изделий, изготовленных на заказ. Автоматизирование ручного процесса визуального контроля через окружающую среду зрения робота может обеспечить более быстрое время цикла и высокий уровень пропускной способности. Кроме того, роботы будут повсеместно использоваться в промышленной сборке, как показано в таблице 14 [33], и будут поддерживать массовую настройку на небольших заводах, где производственные циклы коротки, размеры партий малы, а продукты имеют модульную конфигурацию и сильно изменяются по функциям.

Таблица 14. Роботы в производстве: сегодня и в будущем [33].

Роботы в производстве	В настоящее время	В будущем
<i>Режим производства</i>	Массовое производство	Массовая персонализация
<i>Производство</i>	Длительное время	Короткое время
<i>Размеры лотов</i>	Большой	Небольшой
<i>Конфигурации изделия</i>	Немодульные	Модульные
<i>Характеристики продукции</i>	Ограниченное разнообразие	Сильно меняющиеся

Промышленные роботы в настоящее время могут выполнять монтажные и погрузочно-разгрузочные работы с очень высокой скоростью и впечатляющей точностью. Однако, по сравнению с человеческими операторами, роботам мешает их отсутствие сенсорного восприятия, поэтому возникает потребность в передовых сенсорных возможностях для достижения более сложных задач в неструктурированной среде [91, 59].

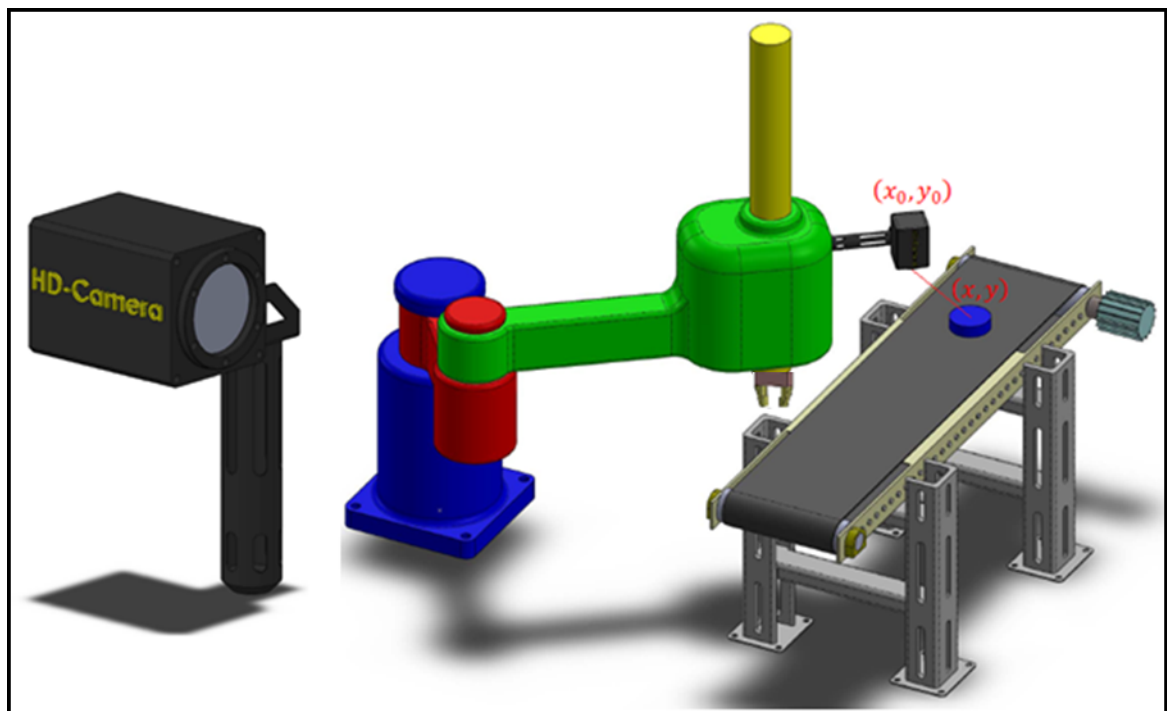


Рисунок 71. Машинное зрение как руководство для робота манипулятора.

4.2 Система машинного зрения (MVS)

Система машинного зрения обеспечивает инновационные решения в направлении промышленной автоматизации [33]. Внедрение автоматизации произвело революцию в производстве, в котором сложные операции были разбиты на простые пошаговые инструкции, которые могут быть повторены машиной. В таком механизме потребность для систематических собраний и осмотра была

осуществлена в различных процессах производства. Эти задачи обычно выполнялись людьми, но эти типы недостатков сделали систему машинного зрения более привлекательной.

Компоненты машинного зрения

Основные компоненты типичной системы машинного зрения были описаны неоднократно [24, 84, 32, 26, 82], в том числе и такие возможные задачи, как получение изображения, обработка, сегментация и распознавание образов.

Роль подсистемы получения изображений машинного зрения в системе компьютерного зрения заключается в преобразовании данных оптического изображения в массив числовых данных, которыми может манипулировать компьютер. На рис. 72 показана простая блок-схема такой системы машинного зрения. Он включает в себя системы и подсистемы для различных процессов.

Большие прямоугольники показывают подсистемы, в то время как части для сбора информации представлены в виде маленьких прямоугольников на Рисунке 72. Предварительная обработка, сегментация, извлечение признаков и другие задачи могут выполняться с использованием этого оцифрованного изображения.

На этом этапе можно выполнить классификацию и интерпретацию изображения, и с учетом описания сцены можно выполнить операцию приведения в действие для взаимодействия со сценой. Подсистема приведения в действие, следовательно, обеспечивает цикл взаимодействия с исходной сценой, чтобы регулировать или модифицировать любое заданное условие для лучшего получения изображения.

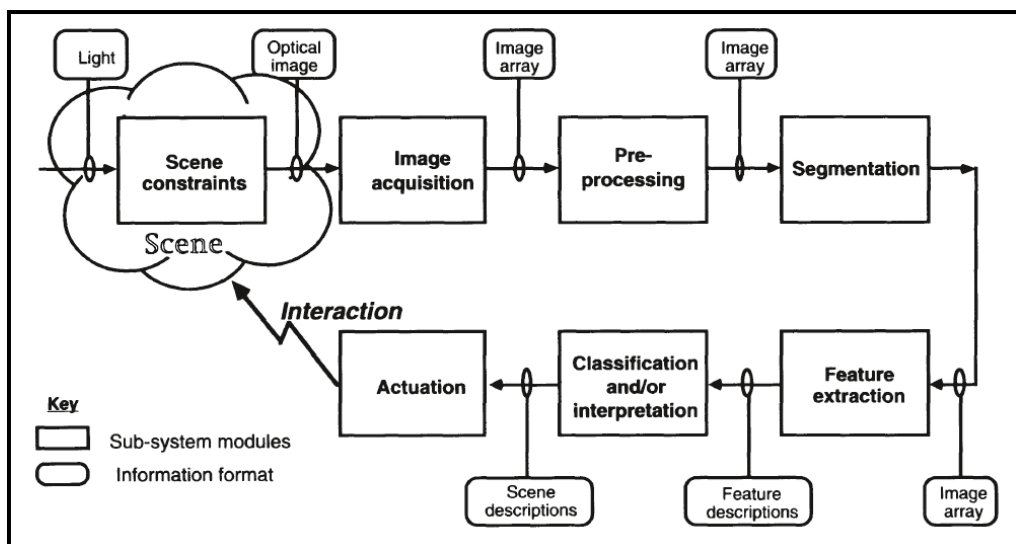


Рисунок 72. Типовая система машинного зрения [24].

Применение машинного зрения

Основное применение компьютерного зрения – автоматическая проверка и управление промышленным роботом [97]. Другие приложения машинного зрения включают в себя:

- 1 - Управление роботом и проверка ориентации компонентов.
- 2 - Инспекция упаковок.
- 3 - Автоматическая проверка печатных плат.
- 4 - Проверка качества древесины. Окончательная проверка узлов.
- 5 - Проверка деталей двигателя, проверка этикетки на продуктах.
- 6 - Проверка медицинских изделий на наличие дефектов.
- 7 - Окончательная проверка камер.
- 8 - Медицинский осмотр флакона.
- 9- Проверка продуктов питания.
- 10-Проверка инженерных компонентов.
- 11- Поверхностный осмотр.
- 12- Обнаружение формовочной вспышки.
- 13- Осмотр перфорированных листов.

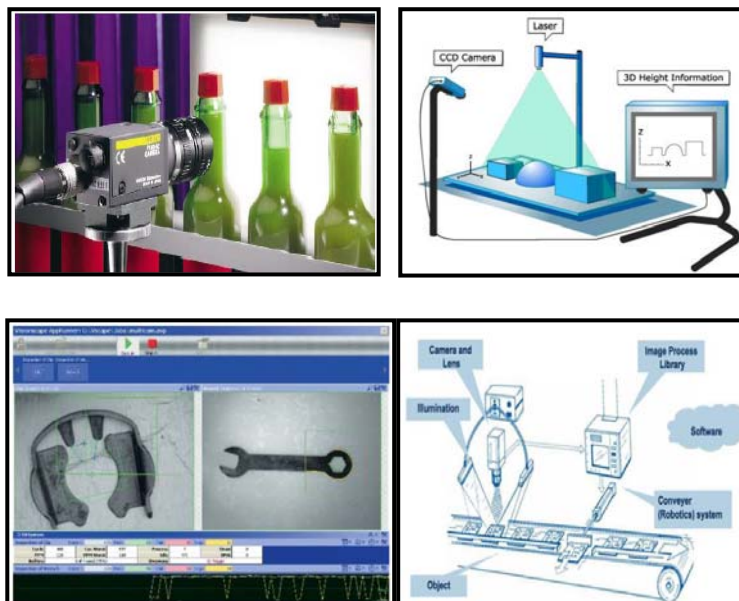


Рисунок 73. Применение машинного зрения: проверка для возможного ограничения жидкости в бутылки, измерения высоты для разных форм, осмотр металлических изделий на трещины и дефекты и проверка упаковок [69].

Применения компьютерного зрения

- 1 - Обнаружение/классификации объектов.
- 2 - Отслеживание людей (безопасность в аэропорту).
- 3 - Развлечения (Kinect).
- 4 - Мониторинг движения транспорта.
- 5 - Распознавание лиц - в киноиндустрии (visual FX).

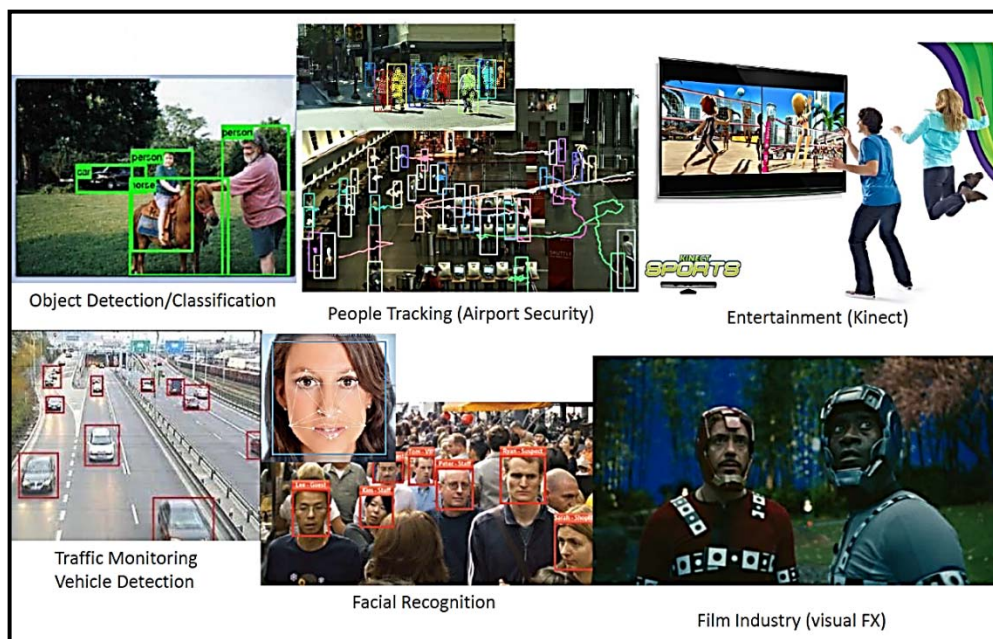


Рисунок 74. Сферы применения компьютерного зрения [117].

4.3 Цветовые модели RGB (КЗС – красный, зеленый, синий) и HSV

Прямоугольная область отображения на экране компьютера состоит из цветных точек, называемых элементами изображения или пикселями. Чем меньше пиксель, тем более плавными будут нарисованные линии. Размер пикселя определяется размером и разрешением дисплея. Например, одно общее разрешение экрана составляет 1680 пикселей на 1050 пикселей, что на 20-дюймовом мониторе создает прямоугольную область отображения, которая составляет 17 дюймов на 10,5 дюймов. Установка меньших значений разрешения увеличивает размер пикселей, делая линии на экране более рваными [56].

Изображение RGB имеет три канала: красный, зеленый и синий. Каналы RGB примерно соответствуют цветовым рецепторам человеческого глаза и используются в компьютерных дисплеях и сканерах изображений. Если изображение RGB является 24-битным (отраслевой стандарт на 2005 г.), каждый канал имеет 8 бит для красного, зеленого и синего, – другими словами, изображение состоит из трех

изображений (по одному для каждого канала), где каждое изображение может хранить дискретные пиксели с обычной интенсивностью яркости от 0 до 255. Если изображение RGB 48-битное (очень высокая глубина цвета), каждый канал состоит из 16-битных изображений.

Недостаток RGB заключается в том, что нет канала с явным указанием яркости, которая может быть вероятным параметром для управления. В этом случае имеет смысл использовать цветовую модель HSV (Hue, Saturation и Value) (см. Рисунок 74).

Цветовое пространство HSV может быть однозначно преобразовано в цветового пространства RGB, поскольку все цвета в пространстве RGB имеют соответствующий уникальный цвет в пространстве HSV, и наоборот.

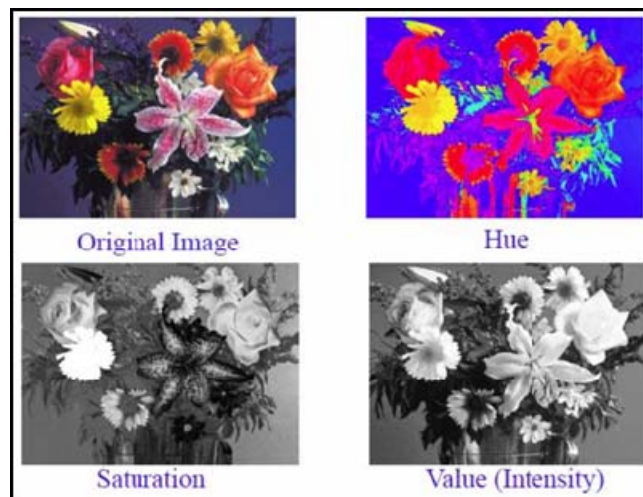


Рисунок 75. Исходное изображение содержит три компонента: оттенок, насыщенность и значение [108].

Сравнение моделей RGB и HSV

HSV цветового пространства часто используется людьми, потому что он соответствует, как люди испытывают цвет, чем в цветовом пространстве RGB (Рисунок 76).

HSV цветового пространства, особенно полезно при обработке объекта, который имеет много ярких областей или отражений.

- В HSV цветового пространства, зеркального отражения будут иметь высокое значение яркости (V) и нижней насыщенность (S).
- Оттенок (H) компонент может стать шумной в зависимости от того, насколько ярким отражением, но объект сплошной цвет, в основном один и тот же оттенок, даже в условиях переменной освещенности.

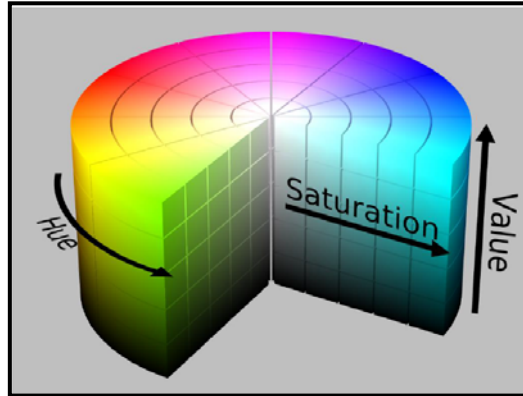


Рисунок 76. Связь между RGB и HSV [108].

Цвет и сегментация

Сегментация - процесс разделения изображения на несколько сегментов.

- Получение цветных сегментов основано на разности пикселей и их отличии от целевого цветового пикселя, и сохранении при этом пикселей, схожих с основным цветом.
- Дизайн изображения имеет функцию, которая вычисляет расстояние между каждым пикселем изображения и заданным цветом.
- Эта функция принимает в качестве аргумента значение RGB целевого цвета и формирует другое изображение, определяемое расстоянием от указанного цвета.

4.4 Экспериментальная работа

Для исследования необходимы следующие инструменты [18]:

- а) HD pro вебкамера Logitech C920 с видеорежимом: (1920*1080 MJPG 30.00fps).



Рисунок 77. HD pro веб-камера Logitech C920 с видеорежимом 1920*1080 MJPG 30.00 fps.

- В) Различные цветные образцы, которые будут проверены по этой методике.



Рисунок 78. Различные цветные образцы, которые будут проверены по этой методике.

б) LabVIEW с модулем развития зрения и дополнительным модулем NI vision.

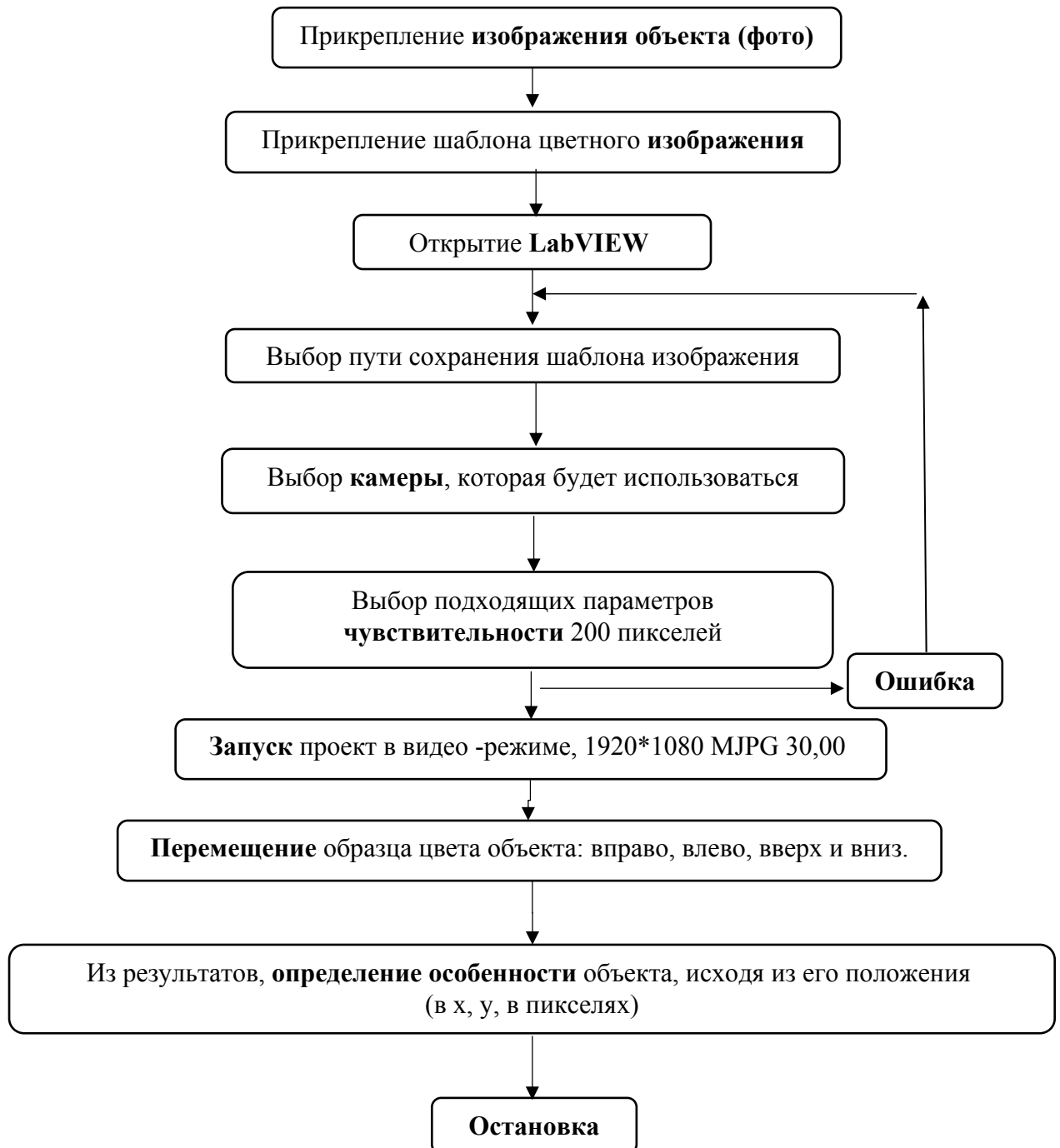


Диаграмма 6. Алгоритм использования системы компьютерного зрения для динамического обнаружения цветных объектов.

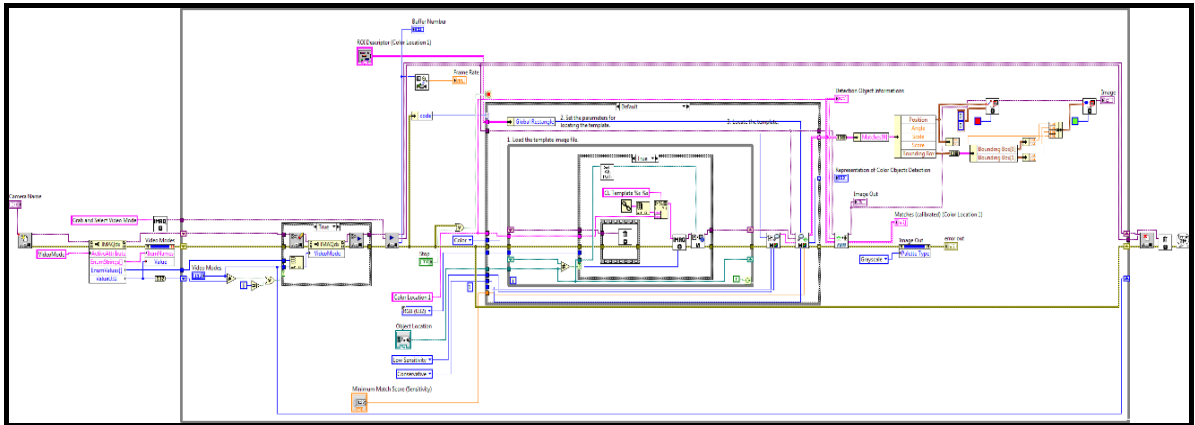


Рисунок 79. Блок-схема исследования системы зрения.

Части блок-схемы, представленные на Рисунке 79:

Имя камеры - настроить местоположение и имя камеры.

Режимы видео - установить подходящий видео-режим в соответствии с использованием камеры.

Минимальная оценка совпадения (чувствительность) - установите параметры для поиска шаблона.

Местоположение объекта - индикатор, показывающий выходное местоположение объекта.

Цвет - загрузить файла шаблона изображения.

Буфер - индикатор номера буфера обработки изображения.

Изображение - индикатор, показывающий завершение вывода изображения.

Обнаружение информации об объекте - индикатор, показывающий результаты вывода представления информации об обнаружении цветного объекта.

Остановка - выход из цикла и остановка управления движением.

Этапы экспериментальной работы:

Шаги нашей экспериментальной работы:

а) Сделаем фотоизображение с помощью HD веб-камеры и программы Assistant.

б) Возьмем и сохраним цветовой объект шаблона из этого фотоизображения.

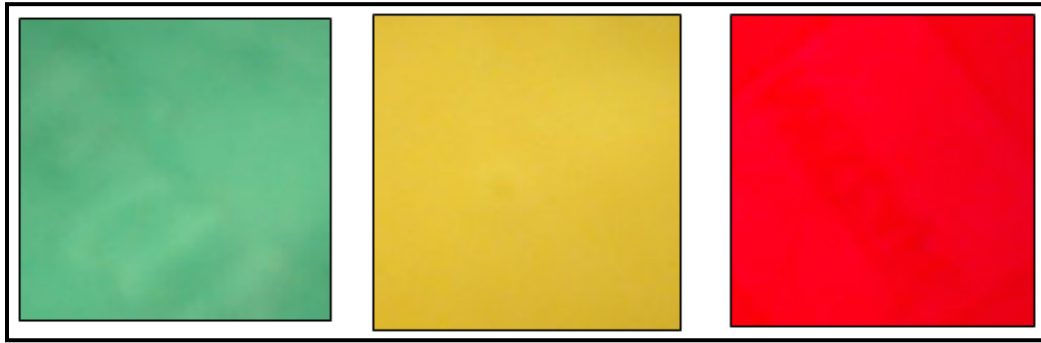


Рисунок 80. Различные шаблоны цветных объектов.

- С) Открыть LabVIEW.
- Д) Выбрать путь к сохраненному шаблону цветного изображения объекта.
- Е) Выбрать название камеры, которая будет использоваться.
- Ф) Выбрать подходящую оценку (чувствительность) в виде 200 пикселей.
- Г) Выполнить запуск программы LabVIEW, а затем выберите режим видео как 1920 * 1080 MJPG 30.00 fps.
- Н) Переместить образец цветного объекта вправо, влево, вверх и вниз.
- И) Мы можем получить результаты, которые отображают информацию об этом движущемся объекте в позиции (в x, y, измеренную в пикселях) и оценку этого объекта обнаружения.

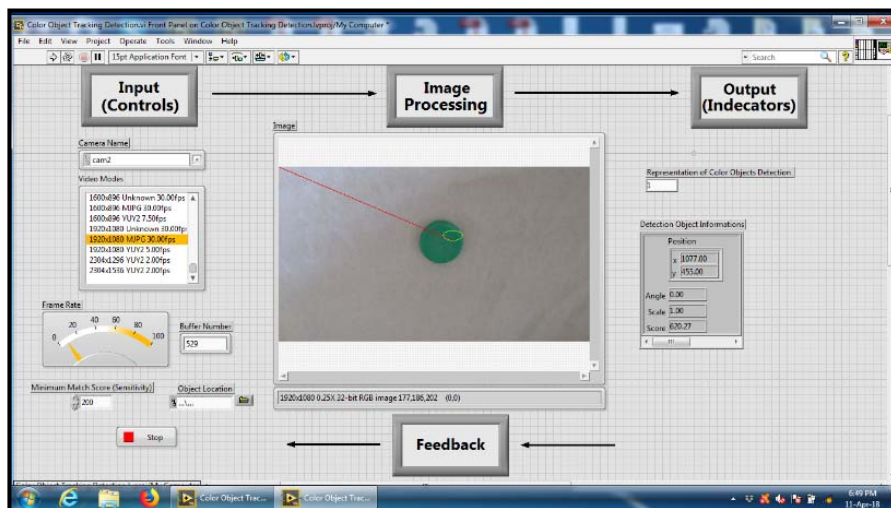


Рисунок 81. (А) Интерфейс программы обнаружения зеленых объектов.

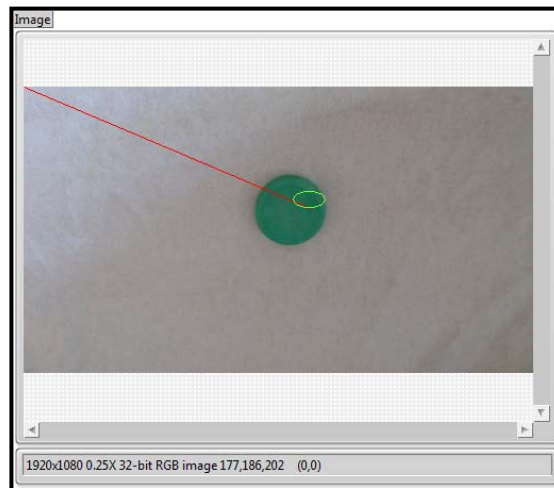


Рисунок 81. В) Обработка изображений обнаружения зеленого объекта в программе.

Эти результаты рассматриваются как обратная связь для нашего экспериментального испытания и могут контролироваться путем изменения:

1- Размер выбранного шаблона объекта изображения.

Возможность изменить минимальный балл (чувствительность), сделать его больше или меньше, чем старое используемое значение.

2 - Мы можем повторить эту работу для любого цветного объекта и получить информацию о его обнаружении.

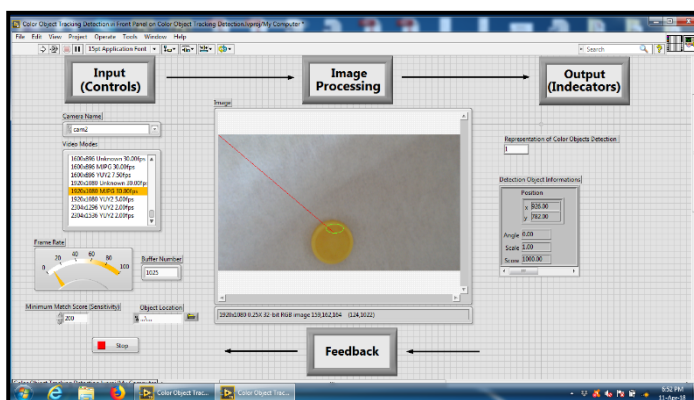


Рисунок 82. (А) Интерфейс программы обнаружения желтых объектов.

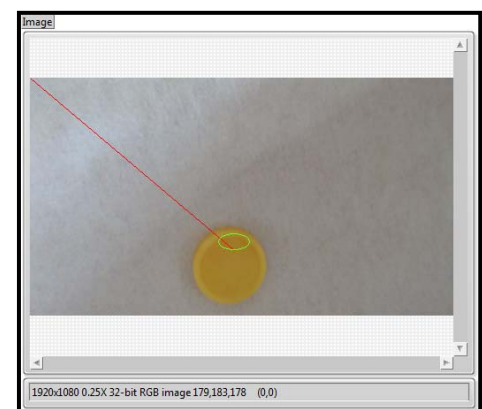


Рисунок 82. В) Обработка изображений обнаружения желтого объекта в программе.

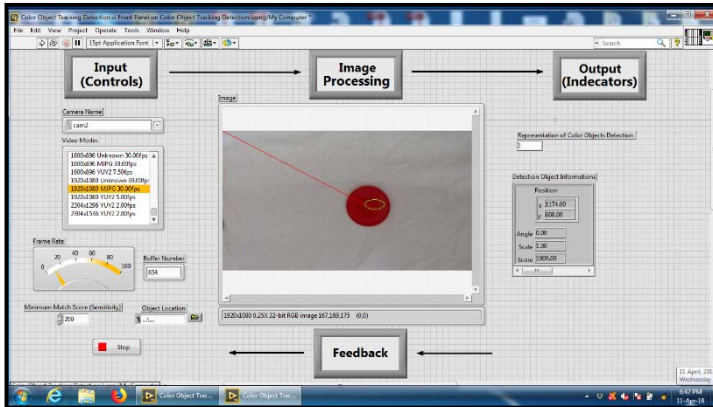


Рисунок 83. (А) Интерфейс программы обнаружения красного объекта.



Рисунок 83. В) Обработка изображений обнаружения красного объекта в программе.

Экспериментальные результаты

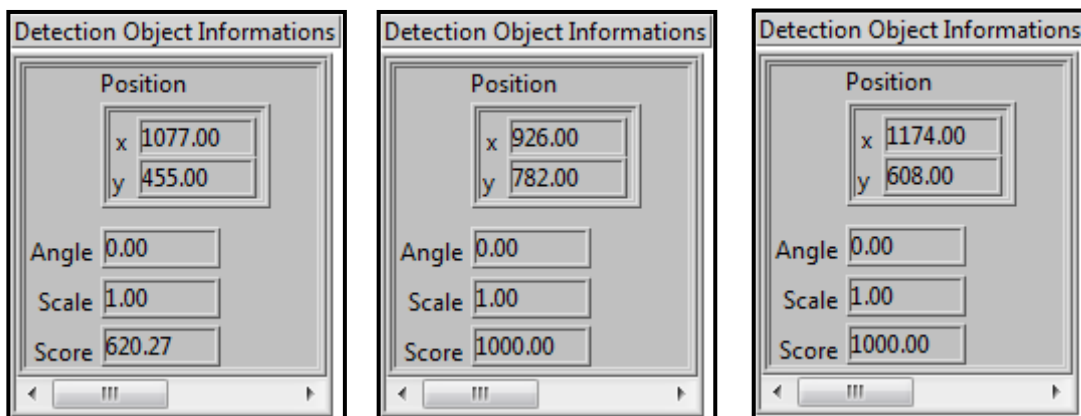


Рисунок 84. Обнаружение объекта информации для зеленого, желтого и красного объекта программы отслеживания.

Выходные данные системы дают нам информацию об объектах при каждом их перемещении в виде положения в координатах x , y в пикселях, поэтому мы можем получить этот путь отслеживания при каждом движении объекта с непрерывным считыванием его координат, как показано на рисунке 84.

Выводы по главе 4

1. Спроектирована и построена на экспериментальном стенде система компьютерного зрения для надежного слежения за движением цветных объектов.
2. Экспериментально доказана возможность преобразования координат, инвариантного распознавания объектов с помощью системы машинного зрения.
3. На основании экспериментальных данных установлена зависимость для определения и измерения координат «х, у» динамического движущегося объекта в пикселях от опорной точки обнаружения по пути отслеживания на основе его цветового шаблона с программного комплекса LabVIEW и NI vision assistant.
4. Опробовано использование программы компьютерного зрения для условий движущейся камеры, что подтверждает возможность установки камеры на роботе-манипуляторе в целях использования в различных промышленных приложениях.
5. Показана возможность отслеживания пути обнаружения движущегося цветного объекта.

Заключение

1. Разработаны математические модели многозвенных технологических манипуляторов типов PUMA, SCARA, KUKA, обеспечивающие заданную точность позиционирования во всём пространстве рабочей зоны.
2. Разработан алгоритм управления технологическим манипулятором роботов типов PUMA, SCARA, KUKA, обеспечивающим оптимизацию заданного критерия в условиях ограничений; алгоритм применён для управления манипулятором PUMA 560 и доказал свою достоверность и работоспособность.
3. Разработана структура системы управления технологическим манипулятором, обеспечивающий оптимальную траекторию движения манипулятора во всём пространстве рабочей зоны за счёт моделирования с учётом физических свойств манипулятора и используемых объектов.
4. Разработана система компьютерного зрения, работающая совместно с созданной системой управления манипулятором.
5. Разработан динамический виртуальный интерфейс для роботов манипуляторов SCARA и PUMA 560, на основе программного обеспечения SolidWorks, LabVIEW, для управления вращательными и линейными двигателями модели.

Перечень сокращений и условных обозначений

Основные обозначения:

x - смещение концевой эффектора робота-манипулятора вдоль оси x от исходной точки вращения $(0, 0, 0)$, мм;

y - смещение концевой эффектора робота-манипулятора вдоль оси y от исходной точки вращения $(0, 0, 0)$, мм;

z - смещение концевой эффектора робота-манипулятора вдоль оси z от исходной точки вращения $(0, 0, 0)$, мм;

d - длина плеча (RRR) робота-манипулятора. Кроме того, линейное вертикальное перемещение L , которое измеряется от передней плоскости манипулятора (RRP) SCARA робота, мм;

El - длина локтя манипулятора, мм;

Wr - длина запястья манипулятора, мм;

L_1 - расстояние между исходной точкой вращения $(0, 0, 0)$ и конечной эффекторной точкой (x, y, z) , измеренное от верхней плоскости манипулятора, мм;

L_2 - проекционная длина El и Wr в верхней плоскости манипулятора, мм;

L_3 - расстояние между точкой вращения и концевым эффектором, измеренное от передней плоскости манипулятора, мм;

ϕ_2 - угол между L_1 и осью X , который измеряется от верхней плоскости робота-манипулятора (RRR). Кроме того, угол между L_1 и осью z , который измеряется от верхней плоскости (RRP) робота SCARA, градусы;

ϕ_3 - угол между L_1 и d , который измеряется от верхней плоскости манипулятора (RRR). Кроме того, угол между L_1 и El , который измеряется от верхней плоскости (RRP) робота SCARA, градусы;

ϕ - угол между осью z и d (угол поворота поворотного двигателя), который измеряется от верхней плоскости манипулятора (RRR). Кроме того, угол между осью z и El (угол поворота поворотного двигателя), который измеряется от верхней плоскости (RRP) робота SCARA, градусы;

θ_2 - угол между L_2 и L_3 , который измеряется от передней плоскости манипулятора, градусы;

θ_3 - угол между El и L_3 , которая измеряется от передней плоскости манипулятора, градусы;

θ - угол между осью X и E1 (угол вращения поворотного двигателя), который измеряется от передней плоскости манипулятора (RRR). Кроме того, угол между W_r и E1 (угол поворота вращающегося запястья двигателя), который измеряется от передней плоскости (RRP) робота SCARA, градусы;

ψ - угол между E1 и W_r (угол поворота запястья), который измеряется от передней плоскости манипулятора, градусы;

A - расстояние проекции d на длинную ось z, измеренное от верхней плоскости манипулятора, мм;

B - расстояние проекции L₂ по длинной оси z, измеряемое от верхней плоскости манипулятора, мм;

C - расстояние проекции d на длинную ось x, измеренное от верхней плоскости манипулятора, мм;

D - расстояние проекции L₂ по длинной оси x, измеренное от верхней плоскости робота-манипулятора, мм;

H - расстояние проекции E1 по длинной оси Y, измеренное от передней плоскости манипулятора, мм;

G - проекционное расстояние W_r по длинной оси Y, измеренное от передней плоскости манипулятора, мм;

E - Расстояние проекции E1 на длинную ось X, измеренное от передней плоскости манипулятора, мм;

F - расстояние проекции W_r на длинную ось x, измеряемое от передней плоскости манипулятора, мм;

L - длина вертикального рычага манипулятора (RRP) SCARA робота, мм;

$V (PHI)$ - угловая скорость вращения электродвигателя (1), град/с;

$V (THETA)$ - угловая скорость вращающегося электродвигателя (2), град/с;

$V (d)$ - линейная скорость линейного двигателя, мм/с;

$A (PHI)$ - угловое ускорение роторного двигателя (1), град/с²;

$A (THETA)$ - угловое ускорение роторного двигателя (2), град/с²;

$A (d)$ - ускорение линейного двигателя, мм/с²;

G - ускорение силы тяжести $g = 9.8 \text{ м/с}^2$;

μ_s - статический коэффициент трения;

μ_d - динамический коэффициент трения;

A_p - векторные координаты кадра {A};

B_p - векторные координаты кадра {B};

${}^A_B T$ - матрица преобразования из кадра {B} в кадр {A};

T_k - крутящий момент при вращательном соединении (k), Н.м;

m_i - масса сустава (i), кг;

d_i - перпендикулярное расстояние между центром сустава и шарниром, мм;

ω_k - угловая скорость роторного двигателя (k), мм;

P_k - мощность двигателя (k), Вт

Сокращения:

DOF - Степень свободы;

RRR - Revolute revolute-- revolute;

RRP - Revolute revolute-- призматический;

Верхний индекс:

\ - Тире.

Нижний индекс:

Wr - Кисть;

El - Колено.

Список литературы

1. Артоболевский И.И. Жизнь и наука: воспоминания. - М.: Наука, 2005, 287с.
2. Белоусов И.Р., Богуславский А.А., Емельянов С.Н., Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Сазонов В.В., Соколов С.М. Взаимодействие робота-манипулятора с подвижными объектами. Препринты ИПМ, 1999
3. Белоусов И. Р. Формирование уравнений динамики роботов-манипуляторов Препринты ИПМ, 2002.
4. Белянин П.Н. Кинематические схемы, системы и элементы промышленных роботов. Текст. М.: Машиностроение, 1992. - 85 с.
5. Белянин П.Н. Состояние и развитие техники роботов. Текст. // Проблемы машиностроения и надежность машин. РАН. 2000. - № 2. - С. 85 - 96.
6. Вульфсон И.И. Колебания машин с механизмами циклового действия. Текст. Л.: Машиностроение, 1990. -243 с.
7. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами: Учебник для вузов. – 2-е изд., исправ. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 480 с.: ил.
8. Зубов Д.В. Программный комплекс для моделирования мехатронного манипулятора / Д.В. Зубов, М.Т.Х. Эраки // Национальный Суперкомпьютерный Форум «НСКФ-2017» — (28.11–1.12.2017).
9. Зубов, Д.В. Современные проблемы управления технологическими манипуляторами в промышленности / Д.В. Зубов, М.Т.Х. Эраки // «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-29 — Сборник трудов XXIX Международной научной конференции — 2016. — Том 3. — С. 233–236.
10. Кафаров В.В., Макаров В.В. Гибкие автоматизированные производственные системы в химической промышленности. - М.: Химия, 1990, –320 с.

11. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. – М.: Химия, 1968, 380 с.
12. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9 томах. Макаров И.М. (ред.). М.: Высш. школа, 1986.
13. Скопинцев, И.В. Проектирование системы управления технологическим манипулятором с помощью пакетов LabVIEW и Solid Work / И.В. Скопинцев, Д.В. Зубов, М.Т.Х. Эраки // IX-й Международный Симпозиум «Полимерная индустрия: Инновации. Эффективность. Ресурсосбережение» — (7–8.12.2016).
14. Филаретов В.Ф., Зуев А.В. Позиционно-силовое управление электроприводом манипулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. №9. С. 20-24.
15. Эраки, М.Т.Х. Программный комплекс для решения обратной кинематической задачи робота с тремя вращательными степенями свободы манипулятора / М.Т.Х. Эраки, Д.В. Зубов // «Естественные и технические науки». — Машины, агрегаты и процессы. — 2018. — № 6. — С. 107–120.
16. Эраки, М.Т.Х. Разработка системы управления манипуляторами роботом манипулятором PUMA 560, работающим на солнечных батареях / М.Т.Х. Эраки, Д.В. Зубов // «Естественные и технические науки». — Машины, агрегаты и процессы. — 2018. — № 3. — С. 102–108.
17. Эраки, М.Т.Х. Управление и исследование динамики робота-манипулятора с использованием программных пакетов LabVIEW и SolidWorks / М.Т.Х. Эраки, Д.В. Зубов // «Естественные и технические науки». — Машины, агрегаты и процессы. — 2018. — № 4. — С. 177–183.
18. Эраки, М.Т.Х. Экспериментальное исследование системы отслеживания цветных объектов с использованием технического зрения / М.Т.Х. Эраки, Д.В. Зубов // «Естественные и технические науки». — Машины, агрегаты и процессы. — 2018. — № 5. — С. 196–203.
19. Юревич Е.И. Основы робототехники. – 2-изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.: ил.

20. Alavandar, S. Neuro-Fuzzy based Approach for Inverse Kinematics Solution of Industrial Robot Manipulators / S. Alavandar, M.J. Nigam // International Journal of Computers. — Communications and Control — 2008 — № 3. — C. 224–234.
21. Alcin, O.F. Extreme learning machine based robotic arm modeling. / O.F. Alcin, F. Ucar, D. Korkmaz // 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). — 2016. — C. 1160–1163.
22. Al-Khedher, MA. SCARA robot control using neural networks. / MA. Al-Khedher, MS. Alshamasin // fourth international conference on intelligent and advanced systems (ICIAS) — 2012 — № 1 — C. 126–130.
23. Angeles, J. On the numerical solution for inverse kinematic problem / J. Angeles // International Journal Robotics. — 1985. — № 4 (2). — C. 21–37.
24. Awcock, G. J. Applied Image Processing Hand Book / G. J. Awcock, R. Thomas // MACMILLAN PRESS LTD — 1995.
25. Baglietto, P. Image Processing on High-Performance RISC Systems / P. Baglietto, M. Maresca, M. Migliardi, N. Zingirian // Proceedings OF THE IEEE — july 1996. — №7. — C. 917-930.
26. Bastuche, C. M. Techniques for Real-time Generation of Range Images / C. M. Bastuche // IEEE — 1989 — C. 262-268.
27. Benjanarasuth, T. Two-degree of freedom simple servo adaptive control for SCARA robot. / T. Benjanarasuth, N. Sowanee, N. Naksuk // international conference on control automation and systems (ICCAS). — 2010. — C. 480–484.
28. Brian, H. What is next for Robotics, Robotic Industries Association? / H. Brian // www.robotics.org — October 2008.
29. Chaudhary, H. Adaptive neuro fuzzy based hybrid force/position control for an industrial robot manipulator / H. Chaudhary, V. Panwar, R. Prasad, [и др.] // Journal of Intelligent Manufacturing. — 2014 — № 27 (6) — C.1299–1308.
30. Christe, B. Robotic Application Research: Past, Present, & Future / B. Christe // www.robotics.org — July 2009.

31. Craig, J. Introduction to Robotics Mechanics and Control (Third Edition) / J. Craig. // Edition Pearson Education. — 2005.
32. Davies, E. R. Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities Hand Book / E. R. Davies // ACADEMIC PRESS LIMITED — 1990.
33. Davies, E. R. Machine Vision: Theory, Algorithms and Practicalities. / E. R. Davies // Chapter 19: Image Acquisition — Academic Press — 1998 — C. 452-470.
34. De Wit, CC. Theory of robot control Hand Book. / CC. de Wit, B. Siciliano, G. Bastin // Springer. — 1996. — New York.
35. Duka, A.V. Neural network based inverse kinematics solution for trajectory tracking of a robotic arm. / A.V. Duka, // Procedia Technol. — 2014 — № 12 — C. 20–27.
36. El-Kafrawy, A. Crack detection by modal analysis in 3D beams based on FEM. / A. El-Kafrawy // International Journal of Mechanics and Materials in Design. — 2011. — № 7. — C. 265–282.
37. ElMaraghy, H. Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems / H. ElMaraghy // Springer. — 2009. — London.
38. ElMaraghy, H. A. Flexible and reconfigurable manufacturing / H. A. ElMaraghy // International Journal of Flex. Manufacturing System — 2006. — № 17— C. 1-16.
39. Elosegui, P. Measurement of the dynamic model of a PUMA 560 robot using experimental modal analysis. / P. Elosegui // Journal of Mechanical Design. — 1994. — № 116.
40. Fu, K. Robotics. / K. Fu, R. Gonzalez, and C. Lee // McGraw-Hill. — 1987. — New York.
41. Giovanni, D. Self-Learning Production Systems (SLPS) –Optimization of Manufacturing process parameters for the Shoe Industry / D. Giovanni // 2013.
42. Goldenberg, A.A. A new approach to kinematic control of robot manipulators / A.A. Goldenberg, J.A. Apkarian, H.W. Smith // ASME Journal Dynamic System Meas. Control. — 1987. — № 109. — C. 97–103.

43. Gomez, S. Design of a 4-DOF robot manipulator with optimized algorithm for inverse kinematics. / S. Gomez, G. Sanchez, J. Zarama, R.M. Castamede, J. Escoto Alcántar, J. Torres, A. Nunez, S. Santana, F. Najera // *Int. J. Mech. Aerosp. Ind. Mechatron. Manuf. Eng.* — 2015 — № 9(6) — C. 929–934.
44. Hall Jr, A.S. A dependable method for solving matrix loop equations for general three-dimensional mechanism / A.S. Hall Jr., R.R. Root, E. Sandgren // *ASME Journal Engineering Ind.* — 1977. — C. 547–550.
45. Hasan, A. An adaptive-learning algorithm to solve the inverse kinematics problem of a 6 D.O.F serial robot manipulator. / A. Hasan, [и др.] // *Advances in Engineering Software* — 2006 — № 37. — C. 432–438.
46. Hasan, T.A. Artificial neural network-based kinematics Jacobian solution for serial manipulator is passing through singular configurations. / T.A. Hasan, [и др.] // *Advances in Engineering Software* — 2010 — № 41. — C. 359–367.
47. Husty, M.L. A new and efficient algorithm for the inverse kinematics of a general serial 6R manipulator. / M.L. Husty, M. Pfurner, H.P. Schrocker. // *Mechanism and Machine Theory* — 2007 — № 42. — C. 66–81.
48. Jasim, W.M. Solution of Inverse Kinematics for SCARA Manipulator Using Adaptive Neuro-Fuzzy Network. / W.M. Jasim // *International Journal on Soft Computing (IJSC)* — 2011. — № 2, 4.
49. Jaber, A.A. Design of an Intelligent Embedded System for Condition Monitoring of an Industrial Robot. / A.A. Jaber // *Springer Theses — Chapter 4: PUMA 560 Robot and Its Dynamic Characteristics* — Springer International Publishing Switzerland — 2017.
50. Jha, P. Intelligent Computation and Kinematics of 4-DOF SCARA Manipulator Using ANN and ANFIS. / P. Jha and B.B. Biswal // *SEMCCO Part II, LNCS 8298.* — 2013. — C. 277–286.
51. Kabuka, M. Microcontroller-based architecture for control of a six joints robot arm. / M. Kabuka, P. Glaskowsky, J. Miranda, [и др.] // *IEEE Trans. Ind. Electron.* — 1988 — № 35, C. 217–221.

52. Karla, P. A neuro-genetic algorithm approach for solving the inverse kinematics of robotic manipulators / P. Karla, N.R. Prakash // IEEE Trans. Rob. Autom.—2003. — № 2. — C. 1979–1984.
53. Karla, P. An evolutionary approach for solving the multimodal inverse kinematics problem of industrial robots / P. Karla, P.B. Mahapatra, D.K. Aggrawal // Mech. Mach. Theory — 2006. — № 41. — C. 1213–1229.
54. Kawamura, M. Encoderless robot motion control using vision sensor and back electromotive force / A. Kawamura, M. Tachibana, S. Yamate, and S. Kawamura // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). — September 2014. — Chicago — USA.
55. Kelly, J. Control of Robot Manipulators in Joint Space / J. Kelly, V.S. Davila, A. Loría // Springer — London — 2005.
56. Kenneth, A. L. Fundamentals of Python: From First Programs through Data Structures Hand Book / A. L. Kenneth // Course Technology, Cengage Learning — 2010.
57. Khalal, O. Robust control of manipulator robot by using the variable structure control with sliding mode. / O. Khalal, A. Mellit, M. Rahim, H. Salhi, A. Guessoum // Mediterranean conference on control and automation. — 2007. — № 07— C.1–6.
58. Khalil, W. Modeling identification and control of robots. / W. Khalil, E. Dombre // Hermes Penton Science. — 2002. — London.
59. King, F.G. Vision guided robots for automated assembly. / F.G. King, G.V. Puskorius, F. Yuan, R.C. Meier, V. Jeyabalan, and L.A. Feldkamp // IEEE, Proceedings of International Conference on Robotics and Automation — 1988 — № 3. — C. 1611 – 1616.
60. Koker R., A study of neural network based inverse kinematics solution for a three-joint robot / R. Koker, C. Oz, T. Cakar, H. Ekiz // Robotics Automation System — 2004. — № 49. — C. 227–234.
61. Koker, R. Reliability-based approach to the inverse kinematics solution of robots

- using Elman's networks. / R. Koker // Engineering Applications of Artificial Intelligence. — 2005 — №18. — С. 685–693.
62. Kopardekar, P. Manual, Hybrid and Automated Inspection Literature and Current Research / P. Kopardekar, A. Mital, S. Anand // Integrated Manufacturing Systems — 1993 — № 1 — С. 18-29.
63. Korkmaz, D. Missing value estimation in a robotic arm dataset by using extreme learning machine. / D. Korkmaz, F. Ucar, O.F. Alcin, // International Engineering, Science and Education Conference — December 2016 — Diyarbakir — Turkey — С. 209–218.
64. Krasilnikyants E. V. Robot Manipulator Control System. / E. V. Krasilnikyants, A. A. Varkov, and V. V. Tyutikov // Automation and Remote Control. — 2013. — ISSN 0005-1179 — № 74 (9). — С. 1589–1598.
65. Kucuk, S. Inverse kinematics solutions for industrial robot manipulators with offset wrists. / S. Kucuk, Z. Bingul // Applied Mathematical Modelling — 2014 — № 38. — С. 1983–1999.
66. Kucuk, S. The inverse kinematics solutions of industrial robot manipulators / S. Kucuk, Z. Bingul // in: Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics — 2004 — Istanbul — Turkey. — С. 274–279.
67. Kung, Y.S. FPGA-based motion control IC for Robot arm. / Y.S. Kung, G.S. Shu // Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology. — 2005. — С.1397–1402.
68. Kung, Y.-S. FPGA-Realization of Inverse Kinematics Control IP for Articulated and SCARA Robot. / Y.-S. Kung, [и др.] // Design and Computation of Modern Engineering Materials, Advanced Structured Materials. — 2014. — № 54. — С. 205-213.
69. LABSPHERE [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.labsphere.com/machine_vision.
70. Levine, W. S. The Control Handbook (Second Edition) / W. S. Levine, [и др.] //

CRC Press. — 2010.

71. Lewis, F. Control of robot manipulators. / F. Lewis, C. Abdallah, D. Dawson // MacMillan Publishing Co. — 1993. — New York.
72. Lewis, F.W. Robot Manipulator Control: Theory and Practice / F.W. Lewis, D.M. Dawson, C.T. Abdallah, //CRC Press — 2003.
73. Ligu, Z. The fault diagnosis of machine based on modal analysis. / Z. Ligu, W. Yutian, Z. Sheng and H. Guangpu // International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation — ICMTMA — 2009. — C. 738–741.
74. Li, M. Adaptive control of robotic manipulators with unified motion constraints./ M. Li, , Y. Li, S.S. Ge, T.H. Lee // IEEE Systems — 2017 — Vol. 47— № 1— C. 184–194.
75. Li, T.S., Chang, Implementation of human-like driving skill by autonomous fuzzy behavior control on an FPGA-based car-like mobile robot. / Li, T.S., Chang, S.J., Chen, Y.X., [и др.] // IEEE Trans. Ind. Electron. — 2003. — № 50. — C. 867–880.
76. Mehrabi, G. Reconfigurable Manufacturing Systems: Key to future manufacturing / G. Mehrabi // Journal of Intelligent Manufacturing — 2000. — № 11— C. 403-419.
77. Mital, A. A comparison between manual and hybrid methods in parts inspection / A. Mital, M. Govindaraju, B. Subramani // Integrated Manufacturing Systems — 1998 — № 9(6) — C. 344–349.
78. Mohamed T. Eraky. Inverse Kinematics Software Design and Trajectory Control Programming of SCARA Manipulator robot / Eraky Mohamed T., Zubov Dmitry V. // International Journal of Engineering Research and Technology. — ISSN 0974-3154 —2018. — Vol. 11 — № 11— C. 1759-1779.
79. Mohamed T. Eraky. Investigation of Forward Kinematics Software Program and Control of 3-DOF Manipulator Robot Using a New Developed Geometrical Approach Method for Improvement of Quality Food and Chemical Industries / Eraky Mohamed T., Zubov Dmitry V., Krysanov Konstantin S. // International Journal of Engineering Research and Technology. — ISSN 0974-3154 — Scopus. — 2019. — Vol. 12 — № 9— C. 1423-1430.

80. Mohamed T. Eraky. Investigation of inverse kinematics software program of KUKA manipulator robot and creation of optimal trajectory control for quality evaluation within chemical production lines / Eraky Mohamed T., Zubov Dmitry V., Krysanov Konstantin S. // International Journal of Engineering Research and Technology. — ISSN 0974-3154 — Scopus. — 2018. — Vol. 11 — № 12 — C. 2135-2158.
81. Mohanty, A. R. Machinery condition monitoring / A. R. Mohanty // Principles and practices. — Taylor & Francis Group. — 2015.
82. Nagaraj K. Delivering FBGA vision to the masses / K. Nagaraj, C. Caltagirone, D. Nair // xcell software journal — 2015 — C. 30-37.
83. Nearchou, A.C. Solving the inverse kinematics problem of redundant robots operating in complex environments via a modified genetic algorithm / A.C. Nearchou // Mech. Mach. Theory. — 1998. — № 33 (3). — C. 273–292.
84. Newman, T. S. A survey of automated virtual inspection / T. S. Newman, A. K. Jain // computer vision and image understanding — № 2(61) — 1995. — C. 231-262.
85. Ngoc Son, N. Robot manipulator identification based on adaptive multiple-input and multiple-output neural model optimized by advanced differential evolution algorithm. / N. Ngoc Son, H.P.H. Anh, N. Thanh Nam, // Int. J. Adv. Robot. Syst. — 2016. — № 14 (1) — C. 1–14.
86. Niemann, J. Development of a reconfigurable assembly system with enhanced control capabilities and virtual commissioning. / J. Niemann, M. Tech // Central University of Technology— IEEE Africon Proceedings. —2017.
87. Novini, A. R. Fundamentals of Machine Vision Inspection in Metal Container Glass Manufacturing. / A. R. Novini // In Proceedings of the Vision Conference — USA — 1990. — C. 58-67.
88. Oh, S.N. Motion control of biped robots using single-chip drive. / S.N. Oh, K.I. SKim, S. Lim, [и др.] // IEEE International Conference Robotics. — 2003 — № 2. — C. 2461–2465.
89. Olaru, A. Assisted Research and Optimization of the proper Neural Network

- Solving the Inverse Kinematics Problem. / A. Olaru, [и др.] // Proceedings of International Conference on Optimization of the Robots and Manipulators — 2012 — C. 827-832.
90. Olaru, A. Optimization of the Robots Fourier Spectrum by Using the Assisted Research, Neural Network, Smart Damper and LabVIEW Instrumentation. / A. Olaru, S. Olaru. // Applied Mechanics and Materials. — 2013. — № 245. — C. 24-32.
91. Peña-Cabrera, M. Machine vision approach for robotic assembly. / M. Peña-Cabrera, I. Lopez-Juarez, R. Rios-Cabrera, and J. Corona-Castuera // Assembly Automation. — 2005. — № 25 (3). — C. 204-216.
92. Potgieter, J. Reconfigurable mechatronic robotic plug-and-play controller. / J. Potgieter, J. Zyzalo, and O. Diegel // In V. Kordic, A. Lazinica, & M. Merdan (Eds.) — Cutting edge robotics. — 2005. — Germany: Pro Literatur Verlag.
93. Pupăză, C. Computer aided engineering of industrial robots. / C. Pupăză, G. Constantin and Ș. Negrilă // Proceedings in Manufacturing Systems. — 2014. — № 9. — C. 87–92.
94. Putra, R.Y. Neural network implementation for inverse kinematic model of arm drawing robot. / R.Y. Putra, S. Kautsar, R.Y. Adhitya, , M. Syai'in, N. Rinanto, I. Munadhif, A. Soeprijanto, / In: Electronics and Smart Devices (ISESD) — 2016. — C. 153–157.
95. Qinghua, S. BP-MPSO Algorithm for PUMA Robot Vacuum Path Planning. / S. Qinghua, L. Juntao // Advances in Intelligent Systems and Computing. — Springer. — 2017. — № 639.
96. Samson, C. Application of the task-function approach to sensor-based control of robot manipulators / C. Samson and B. Espiau // I FAC 11th Triennial World — 1990 — C. 269-274.
97. Shital, S. Comparison of RBF and MLP neural networks to solve inverse kinematic problem for 6R serial robot by a fusion approach. / S. Shital, N. Chiddarwar, B. Ramesh. // Engineering Applications of Artificial Intelligence — 2010. — № 23. —

C. 1083–1092.

98. Siciliano, B. Springer Handbook of Robotics. / B. Siciliano, O. Khatib // Springer International Publishing — 2016.
99. SolidWorks [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.SolidWorks.com>.
100. Spong, M.W. Robot Modeling and Control / M.W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar // Wiley — 2006.
101. Spong, M. Motion control of robot manipulator. / M. Spong — Levine (ed) Handbook control. — CRC Press. — 1996. — C. 1339–1350.
102. Stenmark, J. M. Knowledge-based Instruction of Manipulation Tasks for Industrial Robotics / J. M. Stenmark // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing — 2014.
103. Suhaib, M. A review of some issues and identification of some barriers in the implementation of FMS. / M. Suhaib // International Journal of Manufacturing System — 2007. — C. 1-40.
104. Suvilath, S. IMC-based PID controllers design for a two-links SCARA robot. / S. Suvilath, K. Khongsomboun, T. Benjanarasuth, N. Kominet // TENCON IEEE region 10 conference — 2011 — C. 1030–1034.
105. Jiang, Z-H. Trajectory tracking control of industrial robot manipulators using a neural network controller. / Z-H. Jiang, T. Ishida // IEEE international conference on systems — man and cybernetics ISIC. — 2007. — C. 2390–2395.
106. Raafat, SM. Improving trajectory tracking of a three-axis SCARA robot using neural networks. / SM. Raafat, WK. Said, R. Akmeliawati, NM. Tariq // IEEE symposium on industrial electronics and applications — ISIEA — 2009. — C. 283–288.
107. Raghavan, M. Inverse kinematics of the general 6R manipulator and the related linkages / M. Raghavan, B. Roth // Trans. ASME J. Mech. — 1993 — № 115 — C. 502–508.

108. Ranjay, K. Computer vision and applications Hand Book / K. Ranjay // published by Stanford university — 2017.
109. Rossomando, F. G. Discrete-time sliding mode neuro-adaptive controller for SCARA robot arm / F. G. Rossomando, C. M. Soria // Neural Comput & Applic — 2017. — № 28. — C.3837–3850.
110. Rutherford, J. Using the PUMA 560 robot. / J. Rutherford — 2012.
111. Sanz, J. L. C. Machine Vision Algorithms for Automated Inspection of Thin-Film Disk Heads. / J. L. C. Sanz, D. Petkovic // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence — NOVEMBER — 1988 — № 6 — C. 830-848.
112. Shafarenko, L. Automatic Watershed Segmentation of Randomly Textured Color Images / L. Shafarenko, M. Petrou, J. Kittler // IEEE transactions on image processing — november 1997 — № 11— C.1530-1544.
113. Tingjun W. Simulation design and application of music playing robot based On SolidWorks / W. Tingjun, HU Shenshun, XU Jun, YAN Dewei and BI Jiawen // IEEE Measuring Technology and Mechatronics Automation. —2009.
114. Torres, T. Automated real-time visual inspection system for high-resolution superimposed printings / T. Torres, J. M. Sebastian, R. Aracil, L. M. Jimenez, O. Reinoso // Image and Vision Computing — 1998 — №16 — C. 947–958.
115. Tucker, J. W. Inside Beverage Can Inspection: An Application from Start to Finish. / J. W. Tucker // In Proceedings of the Vision Conference — USA — 1989. — C. 97-107.
116. Tushar J. Automation and Integration of Industries through Computer Vision Systems. / J. Tushar and Meenu // International Journal of Information and Computation Technology — 2013 — ISSN 0974- 2239 — № 3 —, C. 963-970.
117. UCF [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.crcv.ucf.edu/projects/part-based-tracking-vision>.
118. Uicker, J.J. An iterative method for the displacement analysis of spatial mechanisms / J.J. Uicker, J. Denavit, R.S. Hartenberg // ASME Journal Appl. Mech.

— 1964. — № 107. — С. 309–314.

119. Yahya, S. Geometrical approach of planar hyper-redundant manipulators: Inverse kinematics, path planning and workspace. / S. Yahya, [и др.] Simulation Modeling Practice and Theory — 2011 — № 19. — С. 406–422.
120. Yang, C. Neural network-based motion control of an underactuated wheeled inverted pendulum model. / C. Yang, Z. Li, R. Cui, B. Xu // IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst. — 2014 — № 25(11) — С. 2004–2016.
121. Yasuda, G. Microcontroller implementation for distributed motion control of mobile robots. /G.Yasuda, // Proceedings of International workshop on advanced motion control. — 2000 — С. 114–119.