

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



СЫЧКОВ ВЛАДИСЛАВ БОРИСОВИЧ

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЦЕЛЕВЫХ ОПЕРАЦИЙ
ПРИ КОПИРУЮЩЕМ УПРАВЛЕНИИ МАНИПУЛЯТОРАМИ
АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и
обработка информации (в технике и технологиях)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
Тебуева Фариза Биляловна
доктор физико-математических
наук, доцент

Ставрополь – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 АНАЛИЗ СИСТЕМ КОПИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ И ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЦЕЛЕВЫХ ОПЕРАЦИЙ	15
1.1 Анализ систем копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота с экзоскелетного комплекса и известных исследований в предметной области	15
1.1.1 Анализ способов взаимодействия оператора с антропоморфными манипуляторами при копирующем управлении	19
1.1.2 Анализ систем управления антропоморфными манипуляторами через задающее устройство копирующего типа.....	22
1.1.3 Формализация и представление системы управления и физической модели задающего устройства копирующего типа.....	26
1.2 Анализ методов обработки информации с экзоскелетных комплексов для управления манипуляторами антропоморфных роботов и известных исследований в предметной области	33
1.2.1 Задача выявления зависимости обобщённых координат рычажного механизма экзоскелетного комплекса	35
1.2.2 Обоснование зависимости углов поворота рычажного механизма задающего устройства с избыточной подвижностью.....	40
1.2.3 Анализ методов решения задач кинематики применительно к расчету координат руки оператора	44
1.3 Выбор критериев оценки методов и алгоритмов обработки информации	47
1.4 Формулировка научной задачи и обоснование частных научных задач диссертационного исследования	48

1.5	Выводы по разделу.....	51
2	РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ И ОБОБЩЕННОГО АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ С ЭКЗОСКЕЛЕТНОГО КОМПЛЕКСА.....	53
2.1	Разработка метода оценки точности выполнения целевых операций манипулятором антропоморфного робота при копирующем управлении с экзоскелетного комплекса.....	53
2.1.1	Постановка задачи оценки точности выполнения целевых операций манипулятора	53
2.1.2	Метод оценки точности копирующего управления	55
2.1.3	Проверка работоспособности метода	61
2.2	Разработка обобщенного алгоритма обработки информации с экзоскелетного комплекса для повышения точности выполнения целевых операций.....	65
2.3	Разработка алгоритма расчета углов поворота руки оператора на основе информации об углах поворота рычажной системы экзоскелетного комплекса.....	67
2.4	Разработка специального математического обеспечения алгоритма обработки информации с экзоскелетного комплекса для расчета положения локтевого сустава руки оператора при копирующем управлении	70
2.4.1	Постановка задачи разработки специального математического обеспечения алгоритма обработки информации.....	70
2.4.2	Метод расчета положения центра локтевого сустава руки оператора и выбора пространственного положения локтевого узла манипулятора	72
2.4.3	Оценка вычислительной сложности специального математического обеспечения обобщенного алгоритма	76
2.5	Алгоритмы процедур расчёта углов поворота и расчёта искусственных параметров положения руки оператора.....	77
2.6	Выводы по разделу.....	79

3	ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЦЕЛЕВЫХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ КОПИРУЮЩЕМ УПРАВЛЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ.....	82
3.1	Калибровка экзоскелетного комплекса	82
3.2	Оценка точности повторения движений при копирующем управлении с экзоскелетного комплекса.....	84
3.3	Оценка точности выполнения целевых операций манипуляторами при копирующем управлении с применением разработанного обобщенного алгоритма обработки информации.....	90
3.4	Выводы по разделу.....	92
4	РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ К ПРИМЕНЕНИЮ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ	93
4.1	Структурасистемы копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота	93
4.1.1	Модуль считывания значений с узлов экзоскелета.....	97
4.1.2	Модуль связи	99
4.1.3	Модуль сбора данных.....	100
4.1.4	Модуль расчета углов поворота руки оператора.....	102
4.1.5	Модуль передачи сигналов управления антропоморфным манипулятором.....	107
4.2	Имитационная программа для моделирования взаимодействия манипулятора антропоморфного робота с объектами внешней среды.....	108
4.3	Имитационная модель задающего устройства для виртуальной отработки команд управления манипулятором антропоморфного робота....	117
4.3.1	Разработка имитационной модели	119
4.3.2	Разработка пользовательского интерфейса	122
4.3.3	Проверка работоспособности имитационной модели задающего устройства	128
4.3.4	Оценка соответствия углов поворота звеньев имитационной	

модели углам поворота экзоскелета	133
4.4 Выводы по разделу.....	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	137
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ А	155
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	158

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Копирующее управление исполнительными устройствами (манипуляторами) антропоморфных роботов (АР) является актуальным и динамичным направлением развития. В основе копирующего управления лежит одновременное формирование законов движения по всем степеням подвижности манипуляторов АР через устройство для захвата движений оператора – экзоскелетный комплекс (ЭК). ЭК в совокупности с технологиями виртуальной реальности позволяет реализовать эффект виртуального присутствия. Наиболее актуально применение копирующего управления АР в недетерминированной вариативной, а иногда и экстремальной окружающей среде за счет применения естественного интеллекта человека в качестве системы анализа условий работы, принятия необходимых решений и выбора рациональных алгоритмов выполнения целевых операций.

Копирующее управление манипуляторами АР имеет ряд проблем, главной из которых является недостаточная точность выполнения целевых операций. Точность выполнения целевых операций манипулятором АР отечественного экзоскелетного комплекса ЗУКТ-3 от ОА «НПО «Андроидная техника» составляет в пике около 9,8 см. Информация о точности выполнения целевых операций зарубежных экзоскелетных комплексов в открытом доступе отсутствует. В то же время требования по точности выполнения целевых операций манипуляторами антропоморфных роботов достаточно высоки. Основной областью применения отечественного робота FEDOR (SkyBot-F850), реализующего в том числе и копирующее управление, является выполнение космических миссий. Точность выполнения целевых операций для применения робота на МКС должна составлять порядка 0,5 см.

Недостаточная точность выполнения целевых операций с помощью

системы копирующего управления может быть скомпенсирована за счет визуального наблюдения оператором операционной среды и проприоцептивных способностей человека. Однако это сильно повышает трудоёмкость и снижает эффективность выполнения целевых операций. Выполнение некоторых тонких манипуляций становится практически невозможным. Проблема возникает по ряду причин, среди которых можно выделить: отличие антропометрических параметров руки оператора, ЭК и манипулятора АР; несовпадение осей кинематических пар ЭК и осей суставов руки оператора; копирование углов поворота рычажной системы ЭК вместо углов поворота руки оператора и др. Сложность системы копирующего управления и комплексность факторов, обуславливающих низкую точность выполнения целевых операций, требует применения системного подхода для решения обозначенной проблемы.

Актуальной задачей копирующего управления манипуляторами АР является повышение точности выполнения целевых операций, которое может быть достигнуто за счет осуществления копирования манипулятором АР не углов поворота рычажной системы ЭК, а специально введенных искусственных параметров, рассчитываемых на основе углов поворота руки оператора.

Степень разработанности проблемы. Разработка и исследование систем копирующего управления манипуляторами роботов осуществляется в таких отечественных и зарубежных научно-исследовательских и образовательных учреждениях, как ЦНИИ РТК, МГТУ «СТАНКИН», институт механики МГУ, ЮФУ, ИТМО, МФТИ, ТПУ, ТГУ, СПбГПУ, НИУ МЭИ, ДГТУ, АО НПО «Андроидная техника», Telesistence, Kuka, TheBostonUniversityRoboticsLab, KAIST, FudanUniversity, HondaRobotics, SarcosRobotics, KawadaHeavyIndustries, Toyota и др. Большой вклад в исследование копирующего управления манипуляторами внесли ведущие научные коллективы под руководством таких известных ученых, как Кутлубаев И.М., Лукьянов Е.А., Бохонский А.И., Павловский В.Е, Юревич Е.И., Кулешов В.С., Лакота Н.А., Pol R., Егоров И.Н., Готлиб Б.М., Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Пшихопов В.Х., Махдавьян М.,

Хурс С.П., Cela A.F., Javier Y.J., Kanoun O., Lamiroux F., Liu H., Stoll N. и др.

Вместе с тем, для решения описанных проблем и задач в диссертационном исследовании предлагаются методы и алгоритмы обработки информации для повышения точности выполнения целевых операций при копирующем управлении манипуляторами AP, которые включают в себя: метод оценки точности выполнения целевых операций, разработанный обобщенный алгоритм обработки информации с экзоскелетного комплекса, специальное математическое обеспечение данного алгоритма и др.

Объектом исследования является система копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота с экзоскелетного комплекса.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы обработки информации при копирующем управлении манипуляторами антропоморфного робота с экзоскелетного комплекса.

Цель исследования состоит в повышении точности выполнения целевых операций при копирующем управлении манипуляторами антропоморфного робота с экзоскелетного комплекса на основе методов и алгоритмов обработки информации

Научная задача исследования заключается в разработке методов и алгоритмов обработки информации с экзоскелетного комплекса при копирующем управлении манипуляторами антропоморфного робота для повышения точности выполнения целевых операций.

Для достижения поставленной цели и научной задачи необходимо решить следующие **частные научные задачи**:

1. Разработка метода оценки точности выполнения целевых операций манипулятором антропоморфного робота при копирующем управлении с экзоскелетного комплекса на основе сравнения искусственных параметров положений руки оператора и манипулятора антропоморфного робота.

2. Разработка обобщенного алгоритма обработки информации с экзоскелетного комплекса для повышения точности выполнения целевых операций при копирующем управлении манипуляторами антропоморфного

робота.

3. Разработка алгоритма расчета углов поворота руки оператора на основе информации об углах поворота рычажной системы экзоскелетного комплекса.

4. Разработка специального математического обеспечения алгоритма обработки информации с экзоскелетного комплекса для расчета положения локтевого сустава руки оператора при копирующем управлении и определить его эффективность.

Научная новизна. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Метод оценки точности выполнения целевых операций манипулятором антропоморфного робота при копирующем управлении с экзоскелетного комплекса, отличающийся от существующих сравнением степени выпрямления, радиус-вектора центра ладони, углов Эйлера кисти и плоскости, проходящей через суставы руки оператора, и аналогичных параметров манипулятора антропоморфного робота.

2. Обобщенный алгоритм обработки информации с экзоскелетного комплекса для повышения точности выполнения целевых операций при копирующем управлении манипуляторами антропоморфного робота, отличающийся от существующих новыми методами расчета взаимоположения суставов руки оператора, углов поворота руки оператора и методами оценки точности выполнения целевых операций.

3. Алгоритм расчета углов поворота руки оператора на основе информации об углах поворота рычажной системы экзоскелетного комплекса и методов решения задач кинематики, отличающийся от существующих возможностью расчета координат центров суставов руки оператора при отсутствии жесткой сцепки в локтевом суставе.

4. Специальное математическое обеспечение алгоритма обработки информации на основе метода расчета положения центра локтевого сустава руки оператора с использованием геометрического подхода для кинематической цепи с вращательными сочленениями, отличающегося от

существующих низкой вычислительной сложностью и возможностью выбора положения локтевого сустава руки оператора при гибкой сцепке с экзоскелетным комплексом.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в разработке новых методов и алгоритмов обработки информации с экзоскелетного комплекса для определения пространственного положения суставов руки оператора, а также методическое обеспечение количественного сравнения результатов применения математических методов и технических решений в области копирующего управления по положению манипуляторов АР для обеспечения высокой точности выполнения целевых операций.

Практическая значимость работы заключается в повышении точности выполнения целевых операций при копирующем управлении с ЭК с 9,8 до 1,6 см.

Методы исследования. Методологической основой исследования являются методы теории системного анализа. Для решения частных задач, поставленных в работе, применялись методы решения прямой и обратной задачи кинематики с использованием представления Денавита-Хартенберга и методы аналитической геометрии. Для обработки информации с ЭК применялись методы системного анализа сложных прикладных объектов исследования, методы и средства теоретической механики и теории автоматического управления.

В основе разработанного метода оценки точности выполнения целевых операций манипуляторами антропоморфного робота при копирующем управлении с ЭК лежат искусственные параметры, характеризующие положения руки оператора и манипулятора антропоморфного робота. В качестве критериев оценки точности использовались отклонения введенных искусственных параметров положения манипулятора антропоморфного робота от аналогичных параметров руки оператора.

Представленные решения реализованы в виде специального

математического и алгоритмического обеспечения системы копирующего управления манипуляторами АР. Имитационное моделирование выполнено с помощью современных систем компьютерного моделирования MatLab и Mathcad.

Область исследования. Диссертационное исследование соответствует паспорту научной специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации» по 3 пунктам:

п.3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

п.4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации;

п.5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие положения:

1. Метод оценки точности выполнения целевых операций манипулятором антропоморфного робота при копирующем управлении с экзоскелетного комплекса, основанный на параметрах сравнения по степени выпрямления, по радиус-вектору центра ладони, по углам Эйлера кисти и плоскости, проходящей через суставы руки оператора, и аналогичные вращательные пары манипулятора антропоморфного робота.

2. Обобщенный алгоритм обработки информации с экзоскелетного комплекса для повышения точности выполнения целевых операций при копирующем управлении манипуляторами антропоморфного робота, который позволяет производить более точный расчет обобщенных координат руки оператора при отсутствии жесткой сцепки в локтевом суставе руки оператора и экзоскелета.

3. Алгоритм расчета углов поворота руки оператора на основе информации об углах поворота рычажной системы экзоскелетного комплекса и методов решения задач кинематики, который позволяет произвести расчет координат центров суставов руки оператора при отсутствии жесткой сцепки в локтевом суставе.

4. Специальное математическое обеспечение алгоритма обработки информации с экзоскелетного комплекса на основе метода расчета положения центра локтевого сустава руки оператора с использованием геометрического подхода для кинематической цепи с вращательными сочленениями, который позволяет произвести выбор положения локтевого сустава руки оператора при гибкой сцепке с ЭК с низкой вычислительной сложностью.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность и обоснованность результатов исследования подтверждается проведенными вычислительными экспериментами, корректным использованием методов теории системного анализа и рецензированием печатных работ.

Основные результаты работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 6 международных и всероссийских научно-практических конференциях: 30-я Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника и конверсионные тенденции» (г. Санкт-Петербург, 2019); VII Всероссийская научная конференция «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений» (г. Уфа, 2019); XIII Международная научно-техническая конференция «Приборостроение в XXI веке, Интеграция науки, образования и производства» (г. Ижевск, 2017); VI Всероссийская научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Проблемы автоматизации, региональное управление, связь и автоматика» (г. Геленджик, 2017); V и VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая наука для развития информационного общества» (г. Ставрополь, 2016, 2018); на научных семинарах Северо-Кавказского федерального университета (г. Ставрополь, 2017-2019).

Диссертационная работа выполнена в рамках ФЦП ИР 2014-2020 (уникальный идентификатор RFMEFI57517X0166) при финансовой поддержке Министерства высшего образования и науки Российской Федерации по теме «Разработка программно-аппаратного комплекса системы управления на основе решения обратной задачи динамики и кинематики».

Внедрение. Результаты диссертационной работы рекомендованы к внедрению в АО «НПО «Андроморфная техника» в ходе выполнения проекта по разработке задающего устройства копирующего типа для управления манипуляторами антропоморфного робота AR-601; в учебный процесс СКФУ по дисциплине «Робототехнические системы» по направлению 09.04.02 «Информационные системы и технологии», направленность (профиль) «Программное обеспечение робототехнических комплексов»; в предприятие по обращению с радиоактивными отходами ФГУП «РосРАО» для управления мобильным роботизированным манипулятором для работы с радиоактивными отходами; в центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики ЦНИИ РТК в ходе выполнения проекта «Корсет».

Личный вклад автора. В диссертации приведены результаты исследований, выполненные лично автором или при его непосредственном участии. Разработан метод оценки точности выполнения целевых операций манипуляторами АР при копирующем управлении с ЭК. Разработан обобщенный алгоритм обработки информации с экзоскелетного комплекса для повышения точности выполнения целевых операций при копирующем управлении манипуляторами антропоморфного робота. Разработан алгоритм расчета углов поворота руки оператора на основе информации об углах поворота рычажной системы ЭК и применения методов решения прямой и обратной задач кинематики. Разработано специальное математическое обеспечение алгоритма обработки информации с экзоскелетного комплекса, представленное методом расчета положения локтевого сустава руки оператора при копирующем управлении.

Публикация результатов работы. Основные результаты работы отражены в 34 научных трудах, в том числе: в 4 статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России; в 3 статьях в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus; в 5 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ, 2 патентах на полезную модель, 2 итоговых отчетах о проведении научно-исследовательских работ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения и списка литературы, включающего 109 наименований, 2 приложений и изложена на 155 страницах машинописного текста.

1 АНАЛИЗ СИСТЕМ КОПИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ И ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЦЕЛЕВЫХ ОПЕРАЦИЙ

1.1 Анализ систем копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота с экзоскелетного комплекса и известных исследований в предметной области

Для достижения полноты анализа проблемы и последующем формировании модели принятия решений, работа построена по методике системного анализа Квейда, и включает в себя следующие этапы:

- постановка задачи – включает определение проблемы, выявление целей и определение границ задачи (раздел 1: п.1.1-1.2);
- поиск – включает сбор сведений и определение альтернативных средств достижения целей (раздел 1: п.1.2-1.3);
- толкование – построение модели и её использование (раздел 2: п.2.1-2.5);
- реализация – включает агрегирование и практическую реализацию (раздел 3: п. 3.1-3.3);
- подтверждение – включает экспериментальную проверку решения (раздел 4: п.4.1-4.3).

Проблемой, решаемой в диссертационном исследовании, является низкая точность выполнения целевых операций при копирующем управлении манипуляторами антропоморфного робота с экзоскелетного комплекса. С помощью методов теории системного анализа выявлены пути решения данной проблемы и обоснована актуальность разработки методов и алгоритмов обработки информации с ЭК. Для реализации выбранного пути решения

проблемы выполнена формализация и постановка задачи повышения точности выполнения целевых операций при копирующем управлении манипуляторами антропоморфного робота с экзоскелетного комплекса.

Современные темпы развития антропоморфных робототехнических систем обусловлены тенденцией замены человека при выполнении потенциально опасного труда. Перед исследователями стоит ряд задач, решение которых позволит заменить человека в различных отраслях деятельности, включая аварийно-спасательные работы, космические миссии, работы в условиях радиации, во время пожаров, военных действий, природных катаклизмов. Одной из таких задач является задача управления роботом с высокой степенью точности выполнения целевых операций в недетерминированной среде.

Согласно данному плану, проведем анализ функционирования систем копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота с экзоскелетного комплекса.

Управление роботом осуществляется при помощи устройства управления, которое конструируется в зависимости от целей, задач и условий работы мехатронной системы. Существующие системы управления можно поделить на три основных класса, в зависимости от степени участия оператора в процессе работы машины (рис. 1) [1-8].

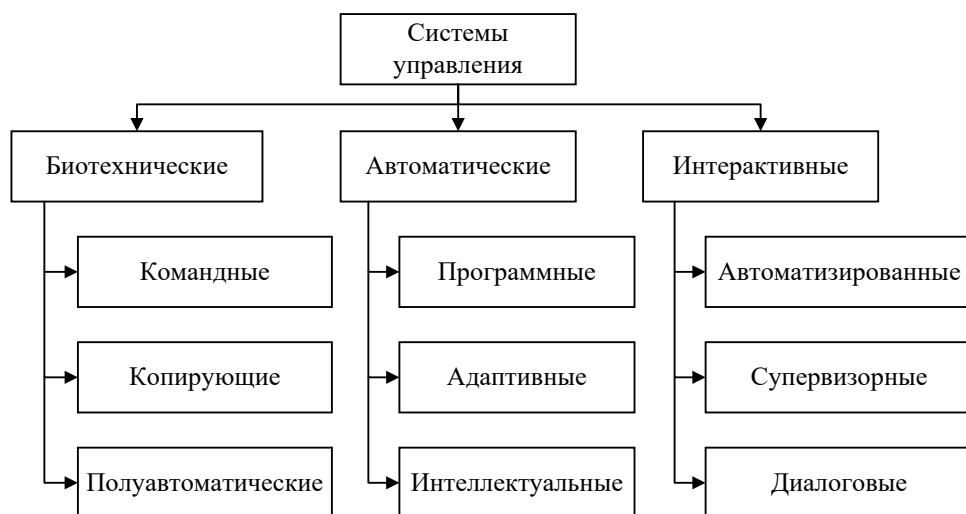


Рисунок 1 – Системы управления робототехническими комплексами

Автоматические системы управления способны работать без участия оператора, так как они функционируют по заранее заложенному алгоритму. Роботы с подобной системой управления используются в тех случаях, когда работа, которую они выполняют, является постоянной, цикличной и не изменяется в процессе выполнения. Общим достоинством подобных систем является их высокая скорость работы и безопасность.

При реализации программных систем управления робот имеет заранее заданную последовательность действий – программу. Достоинствами данной системы являются скорость выполнения работы и безопасность, так как влияние человека полностью исключается. Недостатком является невозможность реализации подобных систем для целого ряда задач.

Адаптивные системы управления являются модифицированной версией программных систем управления. Основное отличие состоит в наличии адаптивного аппаратного обеспечения: камер, датчиков расстояния, касания, системы распознавания цвета/размера/образа и т.п. Данное обеспечение позволяет роботу самостоятельно корректировать свои действия при изменении внешних условий. Основным достоинством данной подкатегории является более широкий спектр решаемых задач. Недостатком является повышенная стоимость и сложность разработки подобных систем.

Интеллектуальные системы управления являются еще более глубокой модернизацией предыдущих двух подкатегорий. Характерным признаком подобной системы является возможность самообучения, планирования и перепланирования действий, обратного общения с человеком, взаимодействия с другими роботами. Достоинством является еще более широкий спектр выполняемых задач. Недостатком – колоссальная сложность разработки подобных систем.

Интерактивные системы управления – это «гибридные» системы, которые основную массу времени работают в автоматическом режиме, но при необходимости могут быть мгновенно переключены на управление человеком,

или человек и автоматика работают поочередно. Отличительной чертой подобных систем является тот факт, что оператор может подавать команды голосом, текстом и т.п. Одним из удобств можно назвать то, что робот при необходимости работает поэтапно, и он не перейдет к следующему этапу до тех пор, пока не получит команду-разрешение от оператора. Данные системы управления объединяют достоинства как автоматических, так и биотехнических систем.

В автоматизированных подсистемах управления могут чередоваться, кооперироваться и объединяться как автоматические, так и биотехнические признаки.

В супервизорных подсистемах управления человек занимается и интеллектуальной стороной работы (например, выбор средства реализации), а машина – вычислительной и непосредственно реализующей.

Диалоговые подсистемы управления являются подкатегорией, где человек и робот работают в тесной кооперации, с постоянным диалогом между оператором и машиной. За счет этого человек всегда имеет наиболее точные данные о деятельности робота, а робот – четкое планирование и выбор стратегии поведения, реализованные совместными усилиями ЭВМ и человека.

Биотехнические системы управления представляют собой задающие устройства, с помощью которых оператор может управлять роботом или программировать его действия. Данные системы можно разделить на командные, полуавтоматические и копирующие.

Командные системы управления представляют собой набор рычагов, кнопок, педалей и иных устройств, отвечающих за определенное звено или функцию механизма. Достоинством данной системы является возможность с большой точностью задать необходимое положение каждого звена устройства. Недостатком – высокая трудоемкость данных действия в случае большого количества подобных звеньев.

Полуавтоматические системы управления являются модернизацией первой подкатегории. Они также позволяют управлять движением робота при

помощи кнопок и рычагов, однако в системе устанавливается микро-ЭВМ, которая занимается вычислением движений робота, что позволяет уменьшить количество действий оператора. Достоинством данной системой, по сравнению с первой подкатегорией, является уменьшение количества действий оператора при управлении роботом. Недостатком является повышенная сложность разработки.

Копирующие системы управления позволяют копировать движения человека и использовать их для управления роботом. Наиболее распространенным видом подобных систем являются экзоскелеты, которые надеваются на всё тело, на несколько частей тела или на отдельную конечность. Достоинствами данных систем являются простота и удобство их использования в недетерминированной вариативной, а иногда и экстремальной окружающей среде за счет применения естественного интеллекта человека в качестве системы анализа условий работы, принятия необходимых решений и выбора рациональных алгоритмов выполнения технологических операций. ЭК в совокупности с технологиями виртуальной реальности позволяет реализовать эффект виртуального присутствия.

На существующем этапе развития робототехнических систем актуально использование копирующих систем управления манипуляторами на основе управляющих сигналов.

1.1.1 Анализ способов взаимодействия оператора с антропоморфными манипуляторами при копирующем управлении

Существующие способы формирования управляющих сигналов для копирующего управления антропоморфным манипулятором определяются программно-аппаратными устройствами ввода-вывода информации, которые использует оператор для управления роботом и программирования действий робота [9-14]. Выделяют следующие способы взаимодействия (рис. 2).

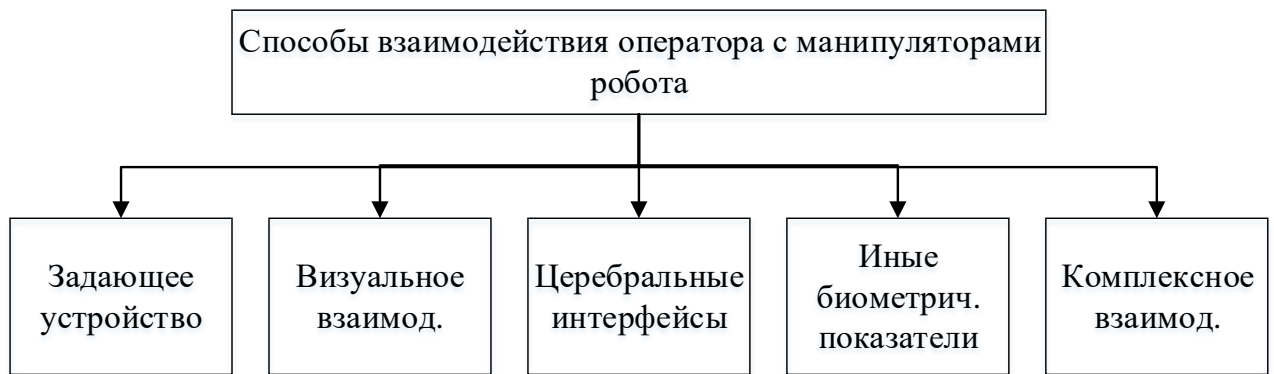


Рисунок 2 – Способы взаимодействия оператора с антропоморфными манипуляторами

Взаимодействие с использованием задающих устройств осуществляется с помощью: кинематически подобных задающих манипуляторов; джойстиков; кнопок/тумблеров; устройств ввода информации в компьютер; педалей; силомоментной обратной связи.

Звуковое взаимодействие осуществляется с помощью: звуковых сигналов; речевых команд; синтеза речи; распознавания речевых команд.

Визуальное взаимодействие осуществляется с помощью: жестов; визуальных сигналов; распознавания выражения лица (мимики); положения глазных яблок; отображения действий робота на экране монитора через графический интерфейс пользователя (GUI).

Взаимодействие через церебральные интерфейсы. Взаимодействие через церебральные интерфейсы (нейрокомпьютерный интерфейс или интерфейс мозг – компьютер) заключается в подключении управляющих контуров робота непосредственно к центральной нервной системе человека за счет электрического или электромагнитного контакта. При этом осуществляется считывание мозговых волн различной природы для использования в контуре управления.

Взаимодействие, использующее иные биометрические показатели. К иным биометрическим показателям относятся: электрическое напряжение в мышцах человека; удельная электрическая емкость кожи человека; проводимость кожи (монограммы).

Комплексное взаимодействие. Данный метод взаимодействия основывается на одновременном использовании разных взаимодействий, например, элементы эмоционального коммуникативного поведения и мультимодальные интерфейсы.

Исходя из анализа существующих методов копирующего управления, проведен сравнительный анализ преимуществ и недостатков способов взаимодействия оператора с антропоморфными манипуляторами, который приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ способов взаимодействия оператора с антропоморфными манипуляторами

№ п/п	Способ взаимодействия	Преимущества	Недостатки
1	Задающее устройство	высокая точность определения углов поворота, отсутствие слепых зон, простота алгоритмов управления, низкая вычислительная сложность алгоритмов управления, простота реализации, отсутствие ограничений при перемещении	сложность и тяжесть конструкции, скованность движения
2	Визуальное взаимодействие	отсутствие оборудования на операторе, отсутствие ограничивающих факторов движения.	низкая точность определения углов поворота, большие задержки при определении положений руки оператора, присутствие слепых зон
3	Церебральные интерфейсы	отсутствие необходимости выполнения физических нагрузок	высокая сложность реализации, необходимость курсов обучения оператора, низкая точность определения углов поворота, нагрузки на нервную систему оператора
4	Иные биометрические показатели	возможность использования при поражениях конечностей, возможность голосового контроля,	сложность реализации, низкая точность

Согласно данным таблицы 1 преимуществом пользуются задающие системы, на примере экзоскелетов. В первую очередь, это обусловлено обеспечением высокой точности регистрации углов поворота руки оператора и отсутствием слепых зон при управлении [15-17].

1.1.2 Анализ систем управления антропоморфными манипуляторами через задающее устройство копирующего типа

Развитием систем копирующего управления манипуляторами АР сегодня занимаются ученые, инженеры и научно-исследовательские коллективы передовых стран. Перечень известных проектов (рис. 3) включает такие страны, как Японию с антропоморфными роботами Telesistence V Telesar V [18], Toyota T-HR3 [19], Model H [20], MELTANT- α [21], США в проектах Sarcos Guardian [22] и Hermes [23], роботы компании Kuka [24]– Германия, Россия – ЗУКТ-3 [25-28] и роботы AR-601, FEDOR и другие.

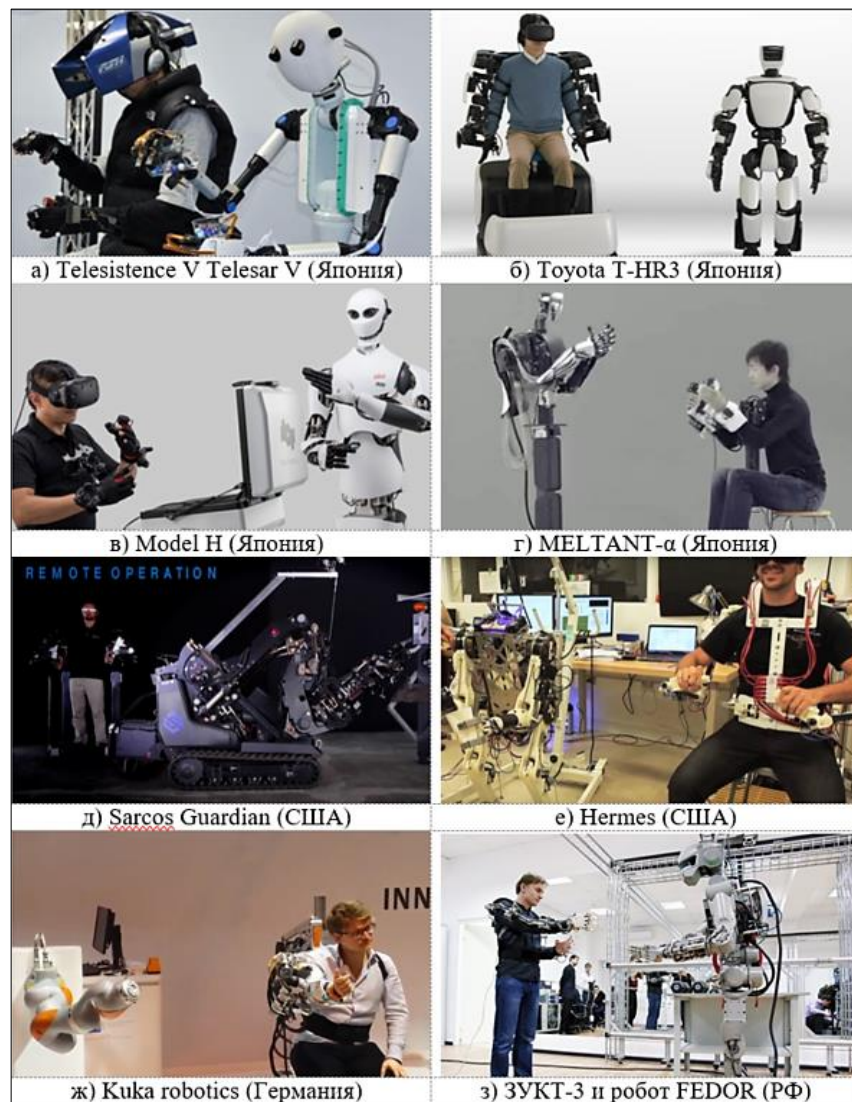


Рисунок 3 – Системы копирующего управления антропоморфными манипуляторами

Дополнительно к известным робототехническим проектам проанализированы способы регистрации обобщенных координат руки оператора на основе значений углов поворота задающего устройства [29-30], экзоскелетные комплексы для управления антропоморфным манипулятором [31-32]; системы управления экзоскелетным комплексом [33-35].

Представленные на рисунке 3 модели манипуляторов АР и системы копирующего управления, описанные в источниках [29-35], реализуют системы управления на основе оптических энкодеров, вследствие чего в диссертационном исследовании рассматривается система управления на их основе.

Предполагаемым субъектом исследований выступает отечественный прототип ЗУКТ-3. ЗУКТ-3 является задающим механизмом, кинематически полностью подобным рабочему манипулятору. При этом каждый шарнир задающего механизма связан по принципу следящей системы с соответствующим шарниром рабочего манипулятора. Задающим устройством, программирующим все движения звеньев манипулятора, является эргономичная рычажная система, надеваемая на оператора [36].

Основными аппаратными проблемами при использовании копирующего способа управления антропоморфными роботами являются: мехатронные ограничения при работе внутренних механизмов, из-за которых происходит комплексная задержка работы внутренних систем управления роботом [32]; проблемы динамического построения и изменения алгоритмов работы из-за аппаратных ограничений различных контроллеров [35]; современные антропоморфные роботы в силу особенностей своей конструкции являются узкоспециализированными и не могут быть модернизированы до надлежащего уровня универсальности [33].

Помимо указанных выше проблем копирующего способа управления антропоморфными роботами, имеется еще одна серьезная проблема – уровень точности при определении обобщенных координат рычажных механизмов ЭК с условием избыточной подвижности.

В роботах TelesistenceVTelesarV, ModelH, MELTANT- α , Hermes определение обобщенных координат звеньев манипулятора производится путем решения обратной задачи кинематики при известных данных звеньев и конечного положения эффектора в пространстве. В таком случае определение обобщенных координат звеньев манипулятора сталкивается с проблемой большой вычислительной сложности при работе в среде с препятствиями, что делает их менее эффективными при выполнении целевых операций в рабочей зоне с препятствиями.

В роботах ToyotaT-HR3, SarcosGuardian, Kuka-Duplicator и ЗУКТ-3 используется экзоскелет для управления всеми звеньями манипулятора с задающего устройства. При этом задающие устройства роботов ToyotaT-HR3, Kuka-Duplicator и SarcosGuardian являются стационарными платформами, где в центр экзоскелета помещается рука оператора, таким образом, углы поворота в задающем устройстве и центры звеньев совпадают. Существенным недостатком данных систем является их габаритность и энергопотребление при эксплуатации. Экзоскелет ЗУКТ-3 является малогабаритной мобильной платформой, что делает его универсальным в различных сферах деятельности. При этом недостатком системы является сложность вычисления углов поворота руки оператора, т.к. в действующем прототипе центры звеньев и углы поворота экзоскелета не совпадают с исполнительным устройством, что сказывается на точности выполнения целевых операций.

По итогам можно сказать, что копирующее управление манипуляторами AP не обеспечивает достаточную точность выполнения целевых операций

Точность выполнения целевых операций манипулятором AP отечественного экзоскелетного комплекса ЗУКТ-3 от ОА «НПО «Андроидная техника» составляет в пике около 9,8 см. Информация о точности выполнения целевых операций зарубежных экзоскелетных комплексов в открытом доступе отсутствует.

Требования по точности выполнения целевых операций манипуляторами антропоморфных роботов достаточно высоки. Основной областью применения

отечественного робота FEDOR (Skybot-F850), реализующего в том числе и копирующее управление, является выполнение космических миссий. Точность выполнения целевых операций для применения робота на МКС, по экспертной оценке, должна составлять порядка 0,5 см., что связано с возможным тремором руки человека. Недостаточная точность выполнения целевых операций с помощью системы копирующего управления может быть скомпенсирована за счет визуального наблюдения оператором операционной среды и проприоцептивных способностей человека. Однако это сильно повышает трудоёмкость и снижает эффективность выполнения целевых операций. Выполнение некоторых тонких манипуляций становится практически невозможным.

Проблема возникает по ряду причин, среди которых можно выделить: отличие антропометрических параметров руки оператора, ЭК и манипулятора АР; несовпадение осей кинематических пар ЭК и осей суставов руки оператора; копирование углов поворота рычажной системы ЭК вместо углов поворота руки оператора и др. Сложность системы копирующего управления и комплексность факторов, обуславливающих низкую точность выполнения целевых операций, требует применения методов системного анализа для решения обозначенной проблемы.

Существующие методы оценки точности выполнения целевых операций заключаются в том, что производится оценка отклонения руки оператора от реального предмета и оценка отклонения манипулятора при копировании. Данный метод оценки абсолютно не объективен. Необходима разработка метода оценки точности повторения движений манипулятора АР при копирующем управлении с экзоскелетного комплекса, а на их основе интегральная оценка точности выполнения целевых операций со сравнением искусственных параметров руки оператора и манипулятора АР.

Таким образом актуальной задачей копирующего управления манипуляторами АР является повышение точности выполнения целевых

операций, которое может быть достигнуто за счет получения расчетных данных об углах поворота руки оператора на основе углов поворота ЭК.

1.1.3 Формализация и представление системы управления и физической модели задающего устройства копирующего типа

Объектом методов и алгоритмов обработки информации с ЭК типа на основе решения обратной задачи кинематики является ЗУКТ, которое представлено прототипом научно-производственного объединения «Андроидная техника» ЗУКТ-3 (задающее устройство копирующего типа, экзоскелет (ЭК)) (рис. 4). ЗУКТ-3 предназначен для копирующего управления трехзвенными манипуляторами с 7-ю степенями подвижности антропоморфной робототехнической системы на примере роботов SAR-400 (1), AR-600 (1), FEDOR.



Рисунок 4 – Экзоскелетный комплекс (ЗУКТ-3)

Устройство представляет собой рычажный механизм, состоящий из трех жестких звеньев (плечевое, локтевое, кистевое) и хвата, идентичного кисти руки человека. Звенья ЗУКТ-3 имеют 7 степеней подвижности: по три для плечевого и кистевого звена, и одно для локтевого. Количество степеней подвижности обеспечивает возможность свободного перемещения руки

оператора для работы в объемном пространстве. Узлы звеньев оснащены датчиками изменения углов ориентации, позволяющих получать численные данные об изменении углов поворота звеньев относительно заданной позиции.

Кинематическая схема экзоскелета идентична кинематической схеме руки человека. В рабочем состоянии экзоскелет надевается на оператора, при этом рычажная система располагается параллельно руке человека. Это позволяет на основе регистрации углов поворота частей руки человека формировать законы движения звеньев манипулятора.

Схема системы копирующего управления с помощью задающего устройства в виде экзоскелета приведена на рисунке 5. С помощью метода декомпозиции структуры построена декомпозиционная модель экзоскелетного комплекса, приведенная на рисунке 5.

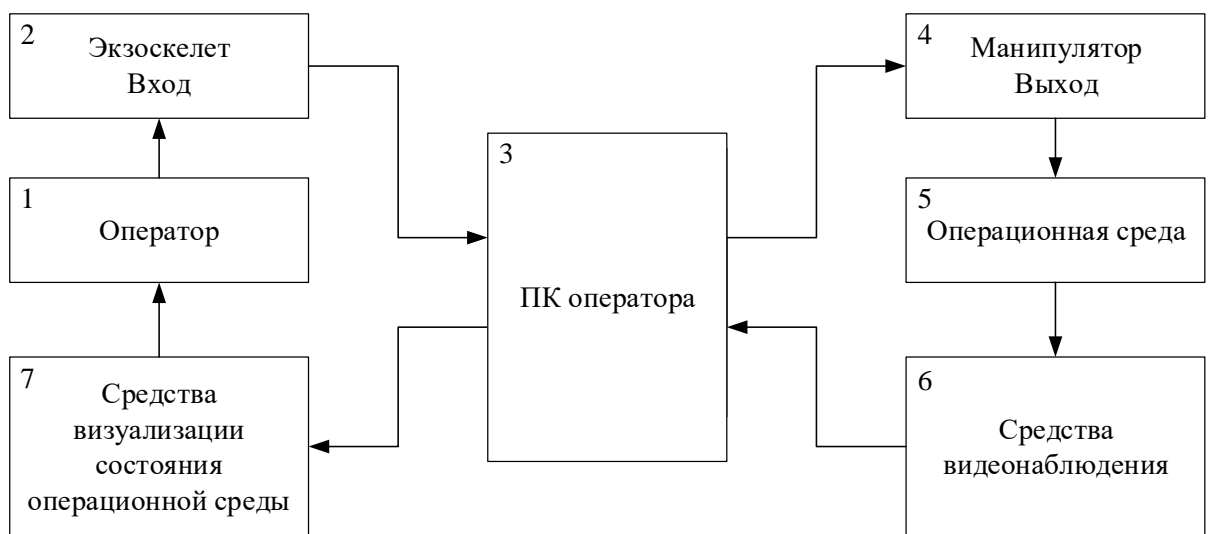


Рисунок 5 – Схема копирующего управления с помощью экзоскелета

С помощью декомпозиции общей цели выявлены ряд подцелей, достигаемых в процессе копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота:

- захват движений оператора;
- формирование целевого положения манипулятора антропоморфного робота;

– обработка манипулятором антропоморфного робота целевого положения.

Рассмотрим контур управления для одной руки оператора. Оператор 1 перемещает руку в положение, описываемое углами поворота θ в его суставах. Рука оператора приводит в движение экзоскелет 2. Экзоскелет 2 представляет собой рычажную систему, звенья которой параллельны руке оператора и связаны с ней механическими связями (рис. 6).

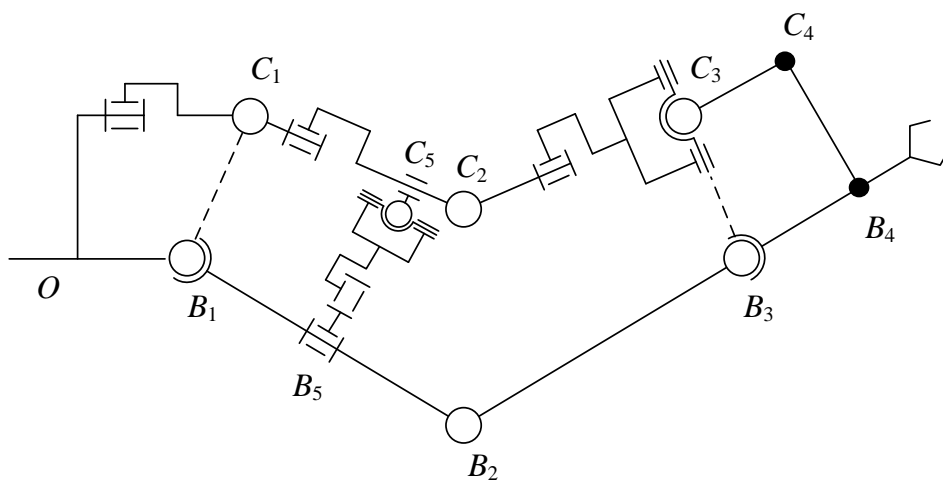


Рисунок 6 – Кинематическая схема руки оператора и экзоскелета

На рисунке 14 рука оператора моделируется кинематической цепью $O - B_1 - B_2 - B_3 - B_4$. Экзоскелет представлен кинематической цепью $O - C_1 - C_2 - C_3 - C_4$. Положение экзоскелета описывается углами поворота θ' в кинематических парах экзоскелета. Вследствие того, что оси вращения экзоскелета не совпадают с осями вращения руки оператора, углы поворота θ' экзоскелета коррелируют, но не совпадают с углами поворота θ руки оператора. Это обстоятельство обуславливает недостатки существующих систем копирующего управления, в которых при расчётах углы поворота θ' экзоскелета используются в качестве углов поворота θ руки оператора.

Измеренные значения углов поворота θ' экзоскелета передаются на персональный компьютер (ПК) оператора 3. ПК оператора осуществляет обработку углов поворота θ' экзоскелета для расчёта углов поворота θ'' в

кинематических парах манипулятора АР. Рассчитанное значение углов θ'' передаётся в систему управления манипулятором 4. На основе следящих систем приводы манипулятора переводят МАР в положение, соответствующее заданным углам θ'' .

В процессе перемещения манипулятор оказывает воздействие на операционную среду 5, состояние которой фиксируется средствами видеонаблюдения 6. Видеопоток со средств видеонаблюдения передаётся на ПК оператора, обрабатывается и визуализируется для оператора с помощью средств визуализации 7.

В данной работе рассматривается часть контура управления, включающая оператора 1, экзоскелет 2, ПК оператора 3, манипулятора АР 4. Входными параметрами для управления являются углы поворота руки оператора θ . Управляемыми параметрами являются углы поворота θ'' манипулятора АР.

Кинематическая схема ЗУКТ-3 представлена на рисунке 15. В качестве кинематической модели руки оператора в работе используется модель антропоморфного манипулятора, на которую накладываются следующие условия. Длины звеньев модели манипулятора должны быть равны длинам частей руки оператора, кинематическая схема аналогична руке человека, а узловые точки находятся в тех же точках объёмного пространства, что и узловые точки руки оператора. Под узловыми точками будем понимать центры суставов и середину кисти руки оператора. На рисунке 7.а представлена кинематическая схема такого антропоморфного манипулятора с 7-ю степенями подвижности, где $B_1 - B_3$ – плечевая, локтевая, и лучезапястная узловые точки; B_4 – узловая точка центра кисти; $A_1 - A_7$ – вращательные кинематические пары. Система координат A_1xyz принята за глобальную.

Известными величинами для руки оператора являются длины плечевой, локтевой и кистевой частей – $l_{B_1-B_2}$, $l_{B_2-B_3}$, $l_{B_3-B_4}$, соответственно. Данные длины вида $l_{B_i-B_j}$ соответствуют расстоянию между узловыми точками B_i и B_j кинематической модели.

В качестве математической модели манипулятора АР, являющегося

кинематической моделью руки оператора, воспользуемся представлением Денавита-Хартенберга. Расположение и ориентация систем координат, связанных со звеньями, приведены на рисунке 7.б, а значения параметров Денавита-Хартенберга указаны в таблице 2.

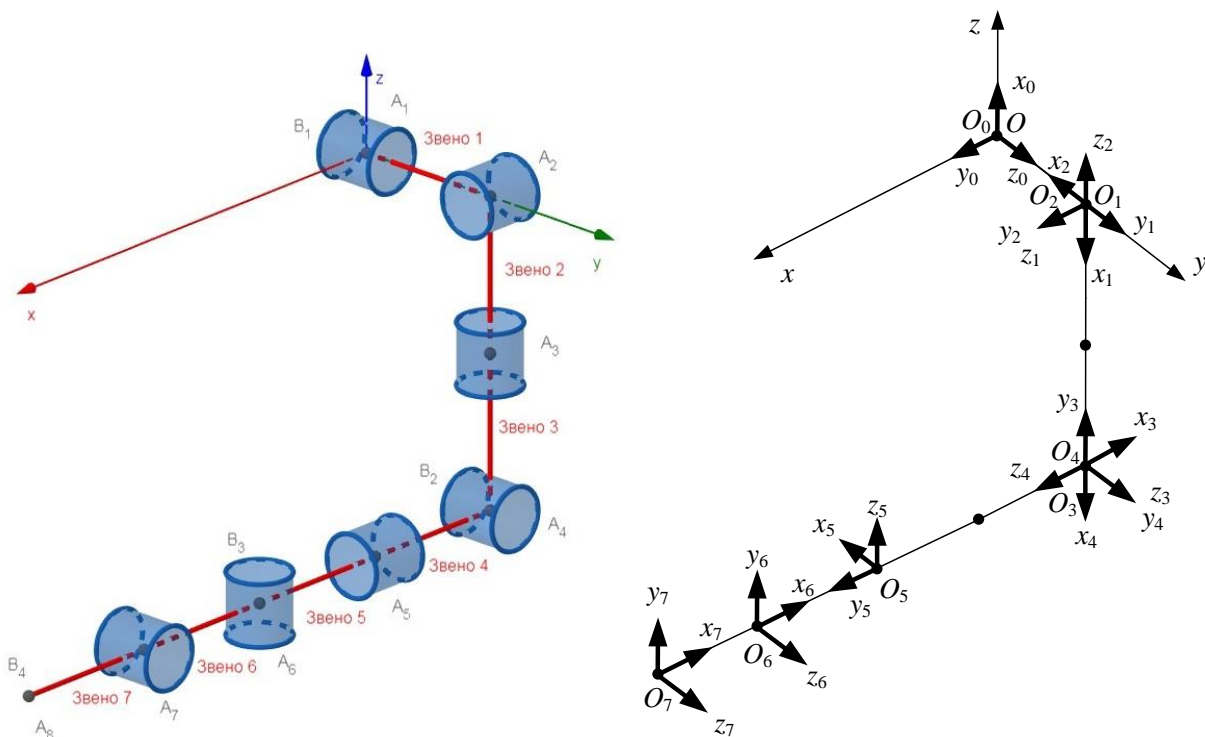


Рисунок 7 – а) кинематическая схема руки оператора; б) связанные со звеньями системы координат

Таблица 2 – Параметры кинематической модели руки оператора

Сочленение	θ_i	α_i	a_i	d_i
1	180°	90°	0	0
2	-90°	90°	0	0
3	-90°	90°	0	$-l_{B1-B2}$
4	-90°	90°	0	0
5	-90°	90°	0	l_{B2-B3}
6	-90°	90°	0	0
7	0°	0°	$-l_{B3-B4}$	0

В соответствие с ПДХ, положение и ориентация i -го звена в системе координат, связанной с $(i - 1)$ -м звеном описывается четырьмя параметрами: $a_i, d_i, \alpha_i, \theta_i$, где a_i – расстояние между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и

началом i -й системы координат, отсчитываемое вдоль оси x_i , т. е. кратчайшее расстояние между осями z_{i-1} и z_i ; d_i – расстояние между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и началом $(i-1)$ -й системы координат, отсчитываемое вдоль оси z_{i-1} ; α_i – угол, на который необходимо повернуть ось z_{i-1} вокруг оси x_i , чтобы она стала сонаправленной с осью z_i (знак определяется в соответствии с правилом правой руки); θ_i – угол, на который надо повернуть ось x_{i-1} вокруг оси z_{i-1} , чтобы она стала сонаправлена с осью x_i (знак определяется в соответствии с правилом правой руки). Таким образом, кинематическая структура и положение манипулятора АР описываются четырьмя векторами $\mathbf{a}, \mathbf{d}, \mathbf{\alpha}, \mathbf{\theta}$. Векторы $\mathbf{a}, \mathbf{d}, \mathbf{\alpha}$ являются постоянными для выбранной кинематической схемы манипулятора АР. Вектором обобщённых координат, однозначно определяющим положение манипулятора АР, является вектор углов поворота $\mathbf{\theta}$. Матрица однородных преобразований из j -й системы координат в i -ю может быть найдена по следующим формулам:

$${}^i\mathbf{T}_j = \prod_{k=i+1}^j {}^{i-1}\mathbf{A}_k, \quad i < j, \quad (1)$$

$${}^{i-1}\mathbf{A}_i = \mathbf{T}_{z,\theta}(\theta_i) \mathbf{T}_{z,d}(d_i) \mathbf{T}_{x,a}(a_i) \mathbf{T}_{x,\alpha}(\alpha_i), \quad (2)$$

$$\mathbf{T}_{z,\theta}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{T}_{z,d}(d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{T}_{x,a}(a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{T}_{x,\alpha}(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где: ${}^i\mathbf{T}_j$ – матрица преобразования из j -й в i -ю систему координат; ${}^{i-1}\mathbf{A}_i$ – однородная матрица сложного преобразования для смежных систем координат; $\mathbf{T}_{z,\theta}(\theta)$ – однородная матрица элементарного поворота вокруг оси z на угол θ ; $\mathbf{T}_{z,d}(d)$ – однородная матрица элементарного сдвига по оси z на расстояние d ; $\mathbf{T}_{x,a}(a)$ – однородная матрица элементарного сдвига по оси x на расстояние a ; $\mathbf{T}_{x,\alpha}(\alpha)$ – однородная матрица элементарного поворота вокруг оси x на угол α ; $\mathbf{a}, \mathbf{d}, \mathbf{\alpha}, \mathbf{\theta}$ – векторы параметров Денавита-Хартенбрега, описывающие кинематическую схему манипулятора.

Решение прямой задачи кинематики, т.е. определение декартовых координат точек O_i , может быть выполнено в матричном виде:

$$\mathbf{O}_i = \mathbf{T}_i \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{T}_0 {}^0\mathbf{T}_i, \quad i > 0, \quad (8)$$

$$\mathbf{T}_0 = \mathbf{T}_{x,\alpha}(-90^\circ)\mathbf{T}_{z,\theta}(-90^\circ), \quad (9)$$

где: \mathbf{O}_i – радиус-вектор начала i -й системы координат в глобальной системе координат; \mathbf{T}_i – матрица преобразования из i -й системы координат в глобальную систему координат; \mathbf{T}_0 – матрица преобразований из 0-й системы координат в глобальную систему координат.

Обозначим левую верхнюю подматрицу размером 3×3 матрицы \mathbf{T}_i как \mathbf{R}_i . \mathbf{R}_i описывает поворот i -й системы координат относительно глобальной системы координат. Также данный поворот может быть описан с помощью

углов Эйлера $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$, которые могут быть вычислены на основе матрицы R_i с помощью следующих формул:

$$R_i \equiv \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\alpha_i = \text{atan2}(a_x, -a_y), \quad (11)$$

$$\beta_i = \text{atan2}(-s_x \cos \alpha_i - s_y \sin \alpha_i, n_x \cos \alpha_i + n_y \sin \alpha_i), \quad (12)$$

$$\gamma_i = \text{atan2}(a_x \sin \alpha_i - a_y \cos \alpha_i, a_z), \quad (13)$$

где: R_i – матрица поворота i -й системы координат относительно глобальной системы координат; n_j, s_j, a_j – элементы матрицы R_i ; $\text{atan2}(x, y)$ – функция арктангенса, вычисляющая значение $\text{arctg}(y/x)$ с учетом принадлежности аргумента соответствующему квадранту. Эта функция определена следующим образом:

$$\text{atan2}(x, y) = \begin{cases} \text{arctg}(y/x), & \text{если } x > 0, y > 0, \\ \text{arctg}(y/x) + \pi / 2, & \text{если } x < 0, y > 0, \\ -\text{arctg}(y/x) - \pi / 2, & \text{если } x < 0, y < 0, \\ -\text{arctg}(y/x), & \text{если } x > 0, y < 0. \end{cases} \quad (14)$$

Задачей разрабатываемых методов и алгоритмов является поиск положений руки оператора, определенных вектором значений углов поворота:

$$\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7)^T.$$

1.2 Анализ методов обработки информации с экзоскелетных комплексов для управления манипуляторами антропоморфных роботов и известных исследований в предметной области

Блок-схема классического обобщенного алгоритма обработки информации с экзоскелетного комплекса (ОАОИ) существующих систем

копирующего управления (СКУ) на примере ЗУКТ-3 от АО НПО «Андроидная техника» представлена на рисунке 8.

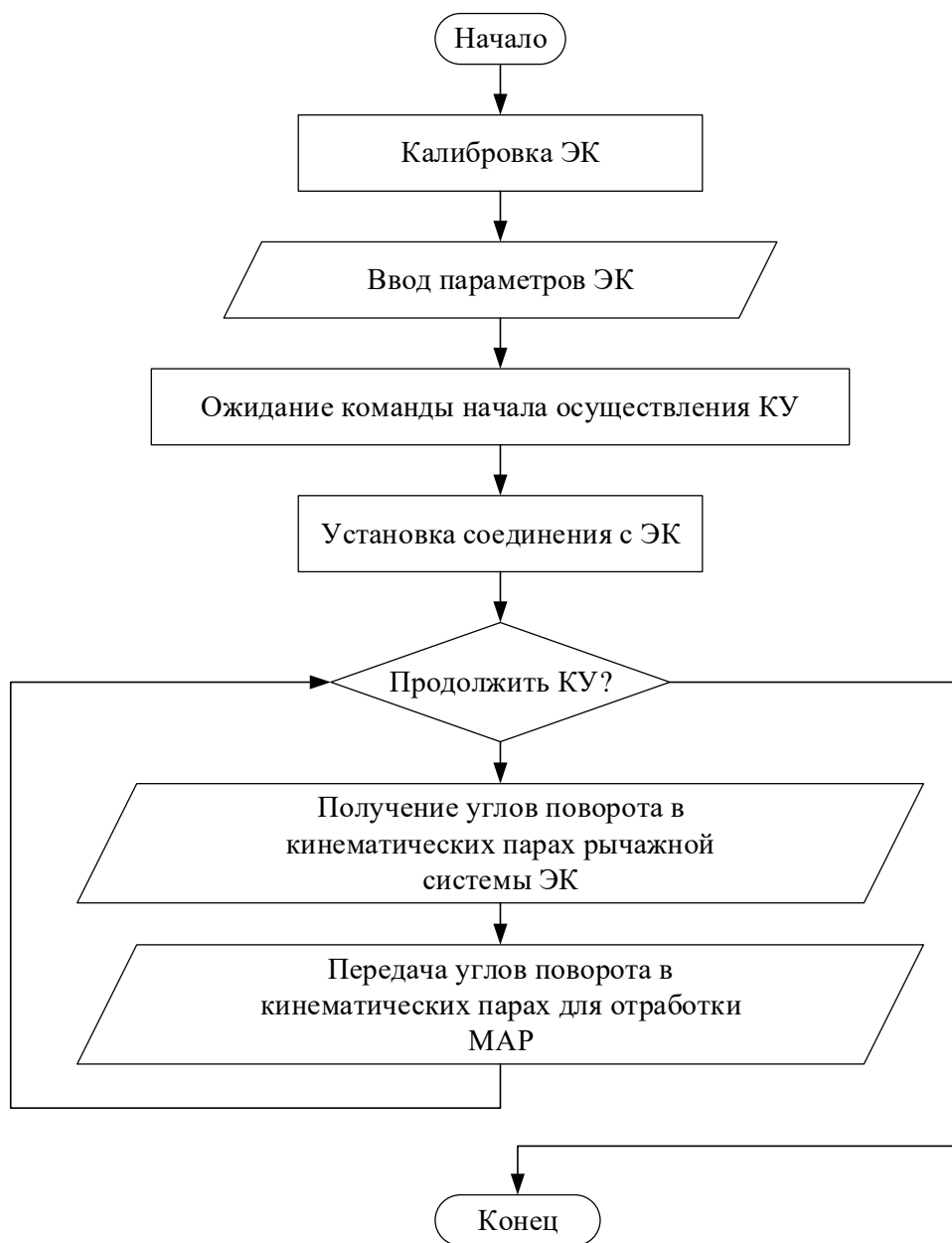


Рисунок 8 – Текущий обобщенный алгоритм обработки информации с экзоскелетного комплекса

При этом, как известно из анализа литературы, данный обобщенный алгоритм дает погрешность в 9,6 см. плюс проприоцепции оператора, что является недопустимым фактором копирующего управления робототехнической системой. Поэтому целью методов и алгоритмов обработки информации с ЭК для определения взаимоположения суставов руки оператора

является повышение точности выполнения целевых операций. По причине отсутствия и неверной оценки точности выполнения целевых операций предлагается использование в качестве метрик точность повторения движений манипулятора за оператором при копирующем управлении с ЭК.

Разработка методов и алгоритмов обработки информации с ЭК для расчета углов поворота руки оператора и их передачи на исполнительный механизм может быть произведена при выявлении зависимости обобщенных координат экзоскелетного комплекса и исполнительного устройства. В случае существования зависимости возможно использование и применение методов решения задач кинематики для повышения точности копирующего управления с экзоскелетного комплекса.

1.2.1 Задача выявления зависимости обобщённых координат рычажного механизма экзоскелетного комплекса

Обобщенные координаты – это независимые параметры, однозначно определяющие положение механической системы в пространстве. Число обобщенных координат соответствует числу степеней свободы. Звено, которому приписываются одна или несколько обобщённых координат механизма, называется начальным звеном [34]. На рисунке 9 система имеет одну степень свободы, поэтому положение системы определяется одной обобщающей координатой s – на рисунке 9.а, φ – на рисунке 9.б. Обобщенные координаты могут иметь размерность длины (метр) или угла поворота (радиан).

На рисунке 9.в положение пластинки в плоскости может быть определено, если будем знать положение на этой плоскости какого-то отрезка, принадлежащего пластинке (например, АВ). Для этого нужно знать координаты какой-либо точки (например, А) и угол наклона отрезка к какой-то оси, то есть в этом примере обобщенными координатами будут: x_A, y_A, φ .

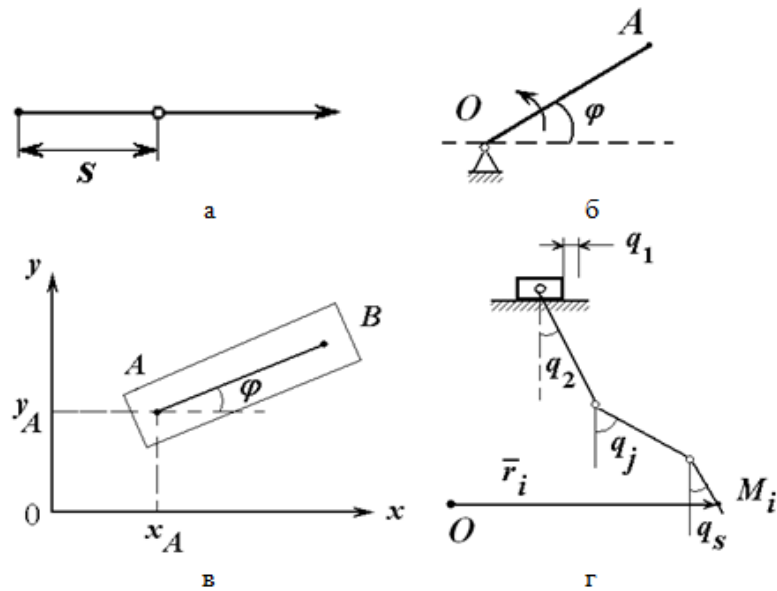


Рисунок 9 – Система с одной степенью свободы

В большинстве случаев звенья совершают в пространстве сложное движение. Движение каждого звена можно рассмотреть в отдельности как сложное движение твердого тела. Из механики известно, что произвольное пространственное движение твердого тела рассматривается как совокупность поступательного движения некоторой точки, принятой за полюс, и вращательного движения тела вокруг оси (рис. 10).

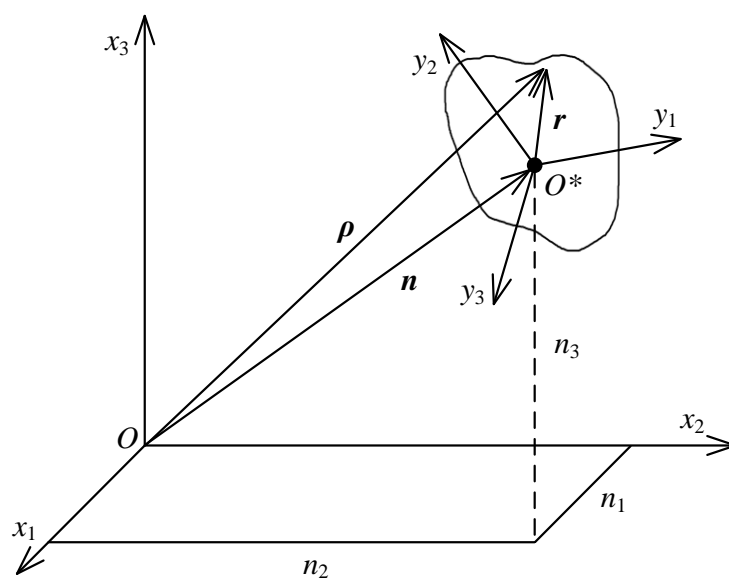


Рисунок 10 – Поступательное и вращательное движения точки твердого тела

Пусть $X(x_1, x_2, x_3)$ – неподвижная система координат, а $Y(y_1, y_2, y_3)$ – система координат, жестко связанная с телом. В этом случае для описания сложного движения достаточно использовать шесть кинематических параметров, например, для описания поступательной части движения можно задать три декартовых координаты n_1, n_2, n_3 и их изменения во времени, а для описания вращательной составляющей можно задать некоторые три угловые координаты.

Поступательная часть движения описывается гораздо проще, чем вращательная. Для описания вращательной части движения еще в прошлом веке введено множество методов. Наиболее используемыми среди них до последнего времени остаются либо углы Эйлера, либо направляющие косинусы. Однако в последнее время в связи с развитием космонавтики, авиации, робототехники для описания движения твердого тела стали применять и другие параметры, которые в некоторых случаях обладают существенными преимуществами [37].

В теоретической механике принято обозначать обобщенные координаты символом q_j . Например, для системы с s степенями свободы (рис. 4.г) обобщенными координатами будут: $q_1, q_2, \dots, q_j, \dots, q_s$, т.е. параметры, с помощью которых можно определить положение любой точки механической системы: $r_i = r_i(q_1, q_2, \dots, q_j, \dots, q_s)$. Для определения положения трехзвенного манипулятора необходимо использование следующих параметров: координаты X, Y, Z , а также трех углов 1, 2, 3 (рис. 11).

В рамках данного пункта рассматривается задача выявления зависимости обобщенных координат рычажного механизма задающего устройства копирующего типа (УКТ) или ЭК для управления трёхзвенным манипулятором с 7-ю степенями подвижности. В силу того, что рычажная система задающего устройства является негибкой, обобщенными координатами определения пространственного положения являются углы ориентации звеньев устройства. Схематическое изображение устройства копирующего типа для управления

трехзвенным манипулятором антропоморфного робота с 7-ю степенями подвижности представлено на рисунке 12.

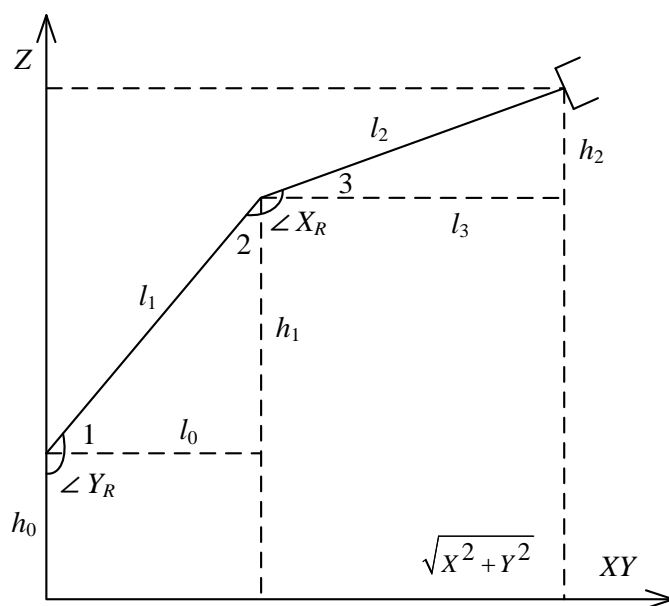


Рисунок 11 – Кинематическая схема трехзвенного манипулятора:

h_0 – высота от установочной площадки до первого звена; l_1 – длина первого звена манипулятора; l_2 – длина второго звена; $\angle X_R$ и $\angle Y_R$ – углы поворота звеньев; X, Y, Z – координаты объекта

На рисунке 12 переменным соответствуют следующие обозначения для УКТ: $A(x_A, y_A, z_A)$ – плечевой узел; $B(x_B, y_B, z_B)$ – локтевой узел; $C(x_C, y_C, z_C)$ – лучезапястный узел; $D(x_D, y_D, z_D)$ – кистевой узел; AB, BC, CD – звенья ЭК; $\alpha_A, \beta_A, \gamma_A$ – углы ориентации звена AB по осям OX, OZ и OY соответственно; α_B – угол ориентации звена BC по оси, образованной вектором, выходящим из звена AB ; $\alpha_C, \beta_C, \gamma_C$ – углы ориентации звена CD по осям OX, OZ и OY соответственно, с точкой отсчёта в звене C ; $\overline{AB}, \overline{BC}, \overline{CD}, \overline{AB}, \overline{BC}, \overline{CD}$ – длины звеньев ЭК.

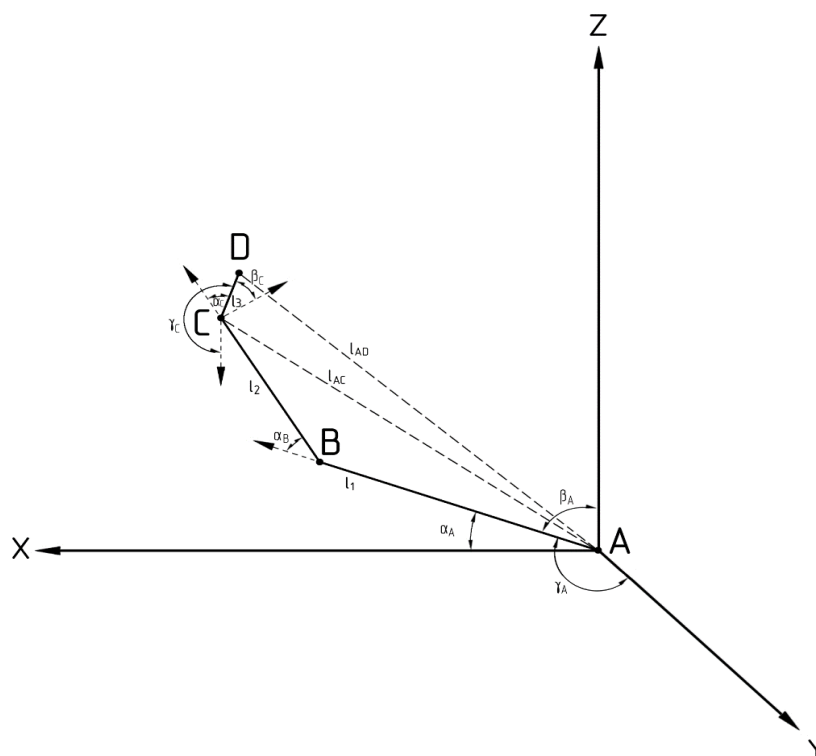


Рисунок 12 – Схема устройства копирующего типа для управления трёхзвенным манипулятором с 7-ю степенями подвижности

Положение звеньев УКТ определяется, если известно положение некоего отрезка звена на заданном векторе. Для этого необходимо выявить координаты узла и угол наклона данного отрезка к оси начала координат, либо к оси, образованной предыдущим звеном. Принцип формирования обобщённых координат представлен в таблице 2.

Таблица 3 – Принцип формирования обобщённых координат устройства копирующего типа для управления трёхзвенным манипулятором с 7-ю степенями подвижности

Узел	Угол наклона звена		
	α	β	γ
A	α_A	β_A	γ_A
B	α_B	—	—
C	α_C	β_C	γ_C

Соответственно, зависимость обобщённых координат для устройства копирующего типа примет вид:

– для плечевого узла:

$$q \begin{pmatrix} \alpha_A \\ \beta_A \\ \gamma_A \end{pmatrix} = \Phi \begin{pmatrix} x_A, & y_A, & z_A, \\ x_B, & y_B, & z_B \end{pmatrix}, \quad (15)$$

– для локтевого узла:

$$q(\alpha_B) = \Phi \begin{pmatrix} x_B, & y_B, & z_B, \\ x_C, & y_C, & z_C \end{pmatrix}, \quad (16)$$

– для кистевого узла:

$$q \begin{pmatrix} \alpha_C \\ \beta_C \\ \gamma_C \end{pmatrix} = \Phi \begin{pmatrix} x_C, & y_C, & z_C, \\ x_D, & y_D, & z_D \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Зависимые (1) – (3) обобщённых координат позволяют определить положение любых искомым точек устройства копирующего типа для управления трехзвенным манипулятором с 7-ю степенями подвижности при помощи решения задачи обратной кинематики.

Представленный способ определения координат системы позволяет упростить расчётную часть и увеличить точность определения конечных точек, что влечёт за собой комплексное повышение производительности системы «задающее устройство - робот».

1.2.2 Обоснование зависимости углов поворота рычажного механизма задающего устройства с избыточной подвижностью

Для решения проблемы низкой точности выполнения целевых операций манипулятором при копирующем управлении с ЭК возможно применение методов решения прямой и обратной задач кинематики при обосновании зависимости обобщённых координат звеньев в пространстве. Предполагается, что координаты звеньев каждого дочернего узла зависят от углов поворота и положений в пространстве всех родительских звеньев манипулятора.

Представим четырехзвенный манипулятор на плоскости, лежащей на осях X и Y (рис. 13).

Если предположить, что узел C является родительским по отношению к узлу D , B – родительский к узлу C , а узел A – родительский к B , то, согласно гипотезе нахождения положений звеньев в пространстве, угол поворота узла A влияет на положения в пространстве всех остальных узлов, в то время, как угол поворота B влияет на положения узлов C и D , а поворот узла C изменит лишь позицию узла D .

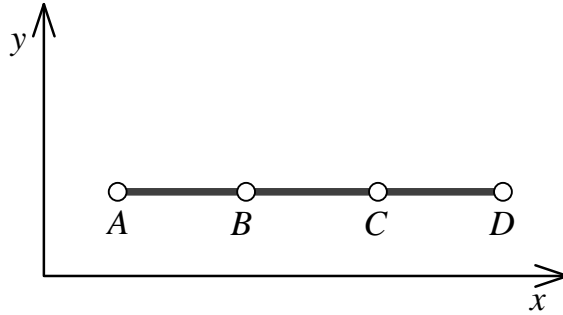


Рисунок 13 – Четырехзвенный манипулятор в плоскости XY

Матрица поворота любого узла по оси Z имеет следующий вид:

$$M_z = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (18)$$

где θ – угол поворота узла в радианах.

Предполагая, что сочленения AB , BC и CD равны и имеют длину 1, и принимая позицию каждого родительского узла за 0 в локальной системе координат, то матрица смещения каждого из дочерних узлов в локальной системе координат сочленения имеет вид:

$$M_T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \text{где } x = 1. \quad (19)$$

Таким образом, матрица нахождения позиции узла D находится следующим образом:

$$M_z \times M_T = \begin{vmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (20)$$

А при повороте узла C на 90 градусов уравнение приобретает следующий вид:

$$M_D = M_z \times M_T = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (21)$$

где первые три элемента четвертого столбца матрицы соответствуют координатам узла D в локальной системе координат сочленения CD (рис. 14):

$$D = (0, -1, 0). \quad (22)$$

В иерархии рассматриваемой системы родительским для C и D является узел B , при повороте которого будут изменяться позиции уже двух дочерних узлов. Матрица перемещения узла C в сочленении BC при повороте родительского узла B на 20 градусов по оси Z имеет вид:

$$M_C = M_z \times M_T = \begin{vmatrix} 0,94 & -0,34 & 0 & 0 \\ 0,34 & 0,94 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,94 & -0,34 & 0 & 0,94 \\ 0,34 & 0,94 & 0 & 0,34 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (23)$$

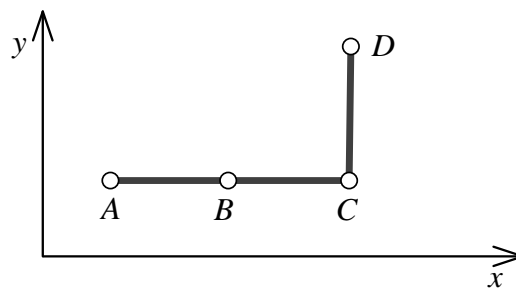
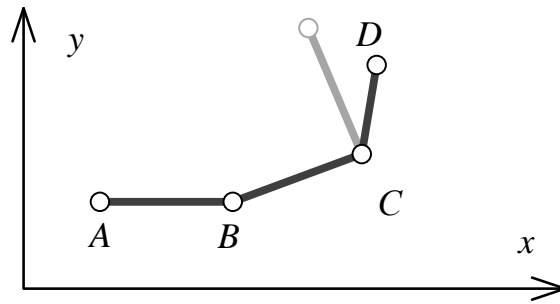


Рисунок 14 – Зависимость положения узла D от поворота узла C

Так же, как и в предыдущем случае, первые три элемента четвертого столбца соответствуют координатам узла C в локальной системе координат сочленения BC (рис. 15).

Рисунок 15 – Некорректные координаты узла D

Как видно из рисунка 15, координаты узла D сместились, что вызвало разрыв между сочленениями BC и CD . Точнее, не найдены обновленные координаты узла D , с учетом его зависимости от родительских узлов.

Согласно приведенной гипотезе, нахождение координат дочерних узлов производится путем умножения матриц поворота и смещения искомого узла на матрицы поворотов и смещений всех родительских узлов в порядке их иерархии в системе. Нахождение координат узла D относительно позиции узла B выглядит следующим образом:

$$M_{D_{\text{новые}}} = M_D \times M_C = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times$$

$$\begin{vmatrix} 0,94 & -0,34 & 0 & 0,94 \\ 0,34 & 0,94 & 0 & 0,34 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -0,34 & -0,94 & 0 & -0,34 \\ 0,94 & -0,34 & 0 & 1,94 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (24)$$

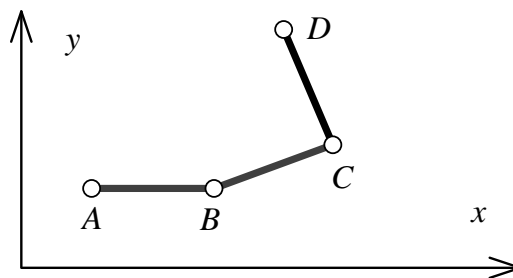


Рисунок 16 – Корректное представление системы сочленений

Таким образом, система сочленений с обновленными координатами узла D принимает корректный вид (рис. 16), что подтверждает гипотезу зависимости положений и поворотов дочерних узлов от положений поворотов родительских, а значит, возможным математическим аппаратом методов и алгоритмов обработки информации с УКТ для повышения точности выполнения целевых операций являются методы решения прямой и обратной задач кинематики.

1.2.3 Анализ методов решения задач кинематики применительно к расчету координат руки оператора

Обоснование зависимости углов поворота рычажного механизма задающего устройства с избыточной подвижностью позволяет применять методы решения задач кинематики. Для обработки информации с ЭК для расчета углов поворота руки оператора планируется применение методов решения прямой и обратной задач кинематики.

Прямая задача кинематики сводится к определению матрицы преобразования, устанавливающей связь между абсолютной и связанной системами координат. Прямая задача обычно многократно используется при проектировании манипулятора. С ее помощью можно определять характеристики рабочей зоны манипулятора со сложной кинематической схемой при наличии ограничений на обобщенные координаты, определять характеристики точности [38, 39], например, точность положения и ориентации захватного устройства, которые обусловлены либо неточным изготовлением звеньев манипулятора, либо неточностями обработки той или иной координаты.

Условно все методы решения прямой задачи кинематики можно разбить на две группы: аналитические методы, позволяющие записать нужные соотношения непосредственно из кинематической схемы манипулятора с использованием матричного аппарата и численные методы, основанные на понятии вектора конечного поворота.

При использовании матричного аппарата вводятся системы координат,

связанные с каждым из подвижных звеньев, а также базовые системы, связанные с основанием. Составляются матрицы перехода от одной системы координат к ближайшей (соседней). Затем перемножают все полученные матрицы перехода, строят результирующую матрицу, связывающую систему координат основания с системой координат любого звена, например, захватного устройства [29].

В методах, основанных на понятии вектора конечного поворота или винта конечного перемещения, для описания движения твердого тела около неподвижной точки используется ряд кинематических параметров [29, 40-46]: углы Эйлера-Крылова, направляющие косинусы, параметры Родрига-Гамильтона, параметры Кейли-Клейна, представление Денавита-Хартенберга. В исключительных случаях, при построении сложных недетерминированных систем могут применяться эволюционные алгоритмы [47], якобианы [48], численные методы для упругих манипуляторов [41]. Перечисленные методы являются индивидуальными под отдельные исполнительные устройства и виды работ, и не могут быть использованы при копирующем управлении в виду их сложности, либо нецелесообразности усложнения задач.

Эффективным, простым и наиболее распространенным методом решения прямой задачи кинематики, используемый в данной работе будет использовано представление Денавита-Хартенберга, представленное в работе [40].

Обратная задача кинематики о положении состоит в определении обобщенных координат манипулятора. Для решения задач обратной кинематики используются различные численные и аналитические методы, обзор таких методов для копирующего управления приведен в публикациях [45-71].

Использование методов решения обратной задачи кинематики для параллельных манипуляторов [45, 46, 64], где один исполнительный (в основном в хирургии), а другой задающий крупноразмерный. Методы решения обратной задачи кинематики не подходят для случая с ЭК по причине того, что в параллельных манипуляторах центры узлов двух устройств совпадают.

Применение нейронных сетей и обучающих моделей для решения задач кинематики в копирующих манипуляторах представлено в работах [49, 56, 58-59, 62-63, 48]. Однако данные решения не актуальны по причине использования естественного интеллекта человека для управления манипулятором с ЭК, что усложняет и делает не нужным процесс обучения манипулятора.

Использование матриц Якоби для решения обратной задачи кинематики при копирующем управлении приведено в работах [60, 66, 68]. Однако применение методов численного дифференцирования и постоянное повышение требований по точности и быстродействию делает невозможным применение данного математического аппарата из-за случаев медленной сходимости метода. По данной причине использование методов на основе дифференциального исчисления не актуально [69, 71].

Из-за необходимости повторения манипулятором AP движений оператора в режиме реального времени возникает сложность в использовании оптимизационных алгоритмов [67, 70], т.к. методы решения оптимизационных задач часто имеют высокую вычислительную сложность.

Методы обработки информации с ЭК представлены в публикациях [50-51, 53-54], при это могут быть применены только для рассматриваемых кинематических цепей и экзоскелетных комплексов.

В работах [57, 65] приведены методы решения задач кинематики и динамики для копирующего управления манипуляторами, при этом нет необходимости в расчете динамических параметров ЭК, т.к. данные значения должны быть считаны с задающего устройства.

Публикация [55] является фундаментальной работой для копирующего управления. В работе приведены уравнения, необходимые для описания и решения прямой и обратной задач кинематики. Описаны топология, геометрия и кинематика трансляционного параллельного механизма с тремя степенями свободы. Однако суть работы отражает только основные топологические и геометрические условия для обеспечения исключительно поступательного

движения звена. В случае использования ЭК возможно (и необходимо) применение вращательных степеней.

Сегодня управление и обработка информации с ЭК осуществляется без решения обратной задачи кинематики путем простого считывания углов поворота ЭК с энкодеров, что на данный момент является самым распространенным методом обработки информации [25-28] и аналогом в данной работе.

Анализ литературы по методам решения задач кинематики и обработки информации с ЭК показал следующее: для определения обобщенных координат центров суставов руки оператора на основе обработки информации с экзоскелета невозможно воспользоваться существующими математическими аппаратами. В большинстве решаемых задач присутствует сложность в определении координат локтевого сустава руки оператора, т.к. имеется бесконечное количество положений данного сустава.

Во всех рассмотренных работах отсутствуют методы оценки точности копирующего управления и вариации положения локтевого сустава руки оператора, кроме прямой проверки точности выполнения целевых операций на основе пространственного положения манипулятора, что часто не соответствует положению руки оператора, а является лишь приспособленностью.

1.3 Выбор критериев оценки методов и алгоритмов обработки информации

Для оценки разработанных методов и алгоритмов обработки информации с экзоскелетного комплекса при копирующем управлении МАР использовались следующие критерии:

- k_r – критерий точности выпрямления МАР;

- $k_\varphi, k_\vartheta, k_\psi$ – критерии точности углов Эйлера плоскости, проходящей через плечевое, локтевое и лучезапястное сочленение МАР;
- $k_\alpha, k_\beta, k_\gamma$ – критерии точности углов Эйлера кистевого звена МАР;
- $c = C(A)$ – вычислительная сложность произвольного алгоритма обработки информации A .

Физический смысл выбранных критериев точности заключается в следующем: критерии равны разности параметров, описывающих положение руки оператора и МАР. Таким образом, чем меньше значение этих критериев, тем выше точность выполнения целевых операций. Поэтому целью выполнения исследования является уменьшение значений критериев оценки точности, по сравнению с существующими системами копирующего управления.

1.4 Формулировка научной задачи и обоснование частных научных задач диссертационного исследования

В практике использования копирующего управления манипуляторами антропоморфных роботов с ЭК присутствуют различные сложности и противоречия.

Во-первых, в существующих ЭК обработка информации с энкодеров производится напрямую таким образом, что углы поворота ЭК передаются прямо на исполнительный механизм, вследствие чего обеспечение высокой точности выполнения целевых операций возможно только при точном совпадении центров суставов руки оператора и звеньев манипулятора АР. Предполагаемый мобильный экзоскелет ЗУКТ-3 имеет разные центры узловых точек с рукой оператора, при управлении присутствуют погрешности, которые оператор устраняет посредством проприоцепции с экзоскелетом. Текущая точность копирующего управления составляет около 9,8% от длины манипулятора.

Во-вторых, выявлена недостаточная комплексность методов оценки точности выполнения целевых операций решения задачи копирующего управления манипулятором АР с использованием ЭК, что сказывается на неверной логике, где манипулятор достигает нужного положения, но не точно повторяет движение за оператором.

В теории применения проанализированных способов формирования команд управления манипуляторами АР в недетерминированной среде возникает противоречие между поставленной целью увеличения точности выполнения целевых операций при копирующем управлении манипуляторами АР и отсутствием эффективных методов обработки информации с мобильных ЭК.

Анализ противоречий, возникающих в практике и теории использования копирующего управления манипуляторами в современных АР, позволил сформулировать прагматическую и научную проблемы.

Прагматическая проблема состоит в низкой точности выполнения целевых операций манипуляторами антропоморфного робота при копирующем управлении с ЭК.

Научная проблема заключается в том, что существующие методы обработки информации с ЭК для управления антропоморфным манипулятором не используют математические методы определения точного взаимоположения центров узловых точек задающего устройства и суставов руки оператора, при этом наблюдается несогласованность оценок точности выполнения целевых операций как точности повторения движений при копирующем управлении, что не позволяет произвести оценку и модернизацию используемых систем управления.

Для решения представленных проблем в работе предлагаются методы и алгоритмы обработки информации с ЭК для управления манипулятором АР.

Научная задача исследования заключается в разработке методов и алгоритмов обработки информации с экзоскелетного комплекса при

копирующем управлении манипуляторами АР для повышения точности выполнения целевых операций.

Выполним математическую постановку задачи исследования. Примем следующие обозначения. S – система копирующего управления. X – множество входных параметров системы копирующего управления, представленных результатами измерения углов поворота в кинематических парах рычажной системы экзоскелета. Y – множество выходных параметров системы копирующего управления, которыми являются углы поворота манипулятора АР. Z – множество внутренних параметров системы копирующего управления S , к которым относятся длины звеньев экзоскелета, частей руки оператора, длины звеньев манипуляторов АР: $Z = \langle l_1, l_2, l_3, l'_1, l'_2, l'_3, l \rangle$. Q – метод оценки точности выполнения целевых операций. A_0 – обобщенный алгоритм обработки информации с экзоскелетного комплекса. A_p – алгоритм расчета углов поворота руки оператора на основе информации об углах поворота рычажной системы экзоскелетного комплекса. M_l – метод расчета положения центра локтевого сустава руки оператора.

Математическая постановка задачи разработки методов и алгоритмов обработки информации имеет следующий вид. Необходимо повысить точность выполнения целевых операций, путем минимизации значений критериев точности:

$$Q(A_0, X, S, Z) \rightarrow \min, \quad (25)$$

за счет разработки нового метода оценки точности выполнения целевых операций манипулятором АР при копирующем управлении с ЭК Q , обобщенного алгоритма обработки информации с ЭК A_0 , алгоритма расчета углов поворота A_p , метода расчета положения центра локтевого сустава M_l , при наличии следующих ограничений:

$$X = \langle \theta'_i | i = 1 \dots 7 \rangle \subseteq X_{\text{доп}}, \quad (26)$$

$$Y = \langle \theta''_i | i = 1 \dots 7 \rangle \subseteq Y_{\text{доп}}, \quad (27)$$

$$C(A_0) < c_{\text{max}} \quad (28)$$

где θ'_i – i -й угол поворота рычажной системы экзоскелета; $X_{\text{доп}}$ – множество допустимых значений входных параметров; $Y_{\text{доп}}$ – множество допустимых значений выходных параметров; θ''_i – расчетное значение i -го угла поворота манипулятора антропоморфного робота; c_{max} – максимально допустимая вычислительная сложность для работа системы копирующего управления в режиме реального времени.

1.5 Выводы по разделу

В разделе рассмотрены существующие способы формирования управляющих сигналов для управления антропоморфным манипулятором.

Рассмотрена классификация систем управления робототехническими комплексами. Доказана перспективность использования копирующего типа управления для выполнения целевых операций манипуляторами АР.

Проанализированы способы взаимодействия оператора с антропоморфными манипуляторами. Показаны преимущества использования экзоскелетных комплексов для копирующего управления манипуляторами АР. Проведен анализ проблем в существующих экзоскелетных комплексах при копирующем управлении. Выявлена проблема низкой точности выполнения целевых операций при управлении с экзоскелетных комплексов, в которых не центры узлов суставов руки оператора и ЭК не совпадают.

Выявлена зависимость обобщённых координат ЭК от зависимости обобщённых координат руки оператора для обеспечения высокой точности выполнения целевых операций манипулятором АР. Проанализированы литературные источники по методам решения задач кинематики и обработки информации с ЭК. По результатам анализа обоснована применимость математических аппаратов для обработки информации с ЭК и расчета углов поворота руки оператора для передачи данных на манипулятор АР. Замечено отсутствие рациональных методов оценки точности копирующего управления.

Приведена формализация системы управления и физической модели ЭК. Выполнена постановка задачи разработки методов и алгоритмов обработки информации при копирующем управлении манипуляторами антропоморфного робота. Сформулированы противоречия в практике и теории применения копирующего управления манипуляторами АР через ЭК. Выявлены прагматическая и научная проблемы исследования. Сформирован объект, предмет, цели и задачи исследования.

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ И ОБОБЩЕННОГО АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ С ЭКЗОСКЕЛЕТНОГО КОМПЛЕКСА

2.1 Разработка метода оценки точности выполнения целевых операций манипулятором антропоморфного робота при копирующем управлении с экзоскелетного комплекса

2.1.1 Постановка задачи оценки точности выполнения целевых операций манипулятора

Копирующее управление предназначено для реализации виртуального присутствия оператора в работе. Виртуальное присутствие оператора в работе позволяет удалённо выполнять целевые операции в условиях, опасных для жизни и здоровья человека. Для точного выполнения целевых операций процесс копирующего управления должен удовлетворять следующим требованиям:

- подобие положений рук оператора и манипулятора;
- максимизация задействованного рабочего пространства манипулятора;
- отсутствие столкновений звеньев манипулятора.

Требование подобия положений рук оператора и манипулятора АР является скорее абстрактным и интуитивным, чем конкретным и формализованным. Подобие может быть реализовано различными способами. Подробнее данный вопрос рассмотрен в данном разделе.

Метод оценки точности копирующего управления должен оценивать соответствие процесса копирующего управления предъявляемым к нему

требованиям на основе известных входных величин, характеризующих процесс управления.

Для оценки точности копирующего управления в качестве известных входных данных могут использоваться следующие величины:

- неизменяемые параметры Денавита-Хартенберга руки оператора a, d, α и АМ a', d', α' ;
- вектор обобщенных координат θ руки оператора;
- вектор обобщенных координат θ' манипулятора АР;
- ширина плеч оператора m ;
- «ширина плеч» антропоморфного робота m' .

Примем следующие обозначения. S – система копирующего управления. X – множество входных параметров методов, представленных результатами измерения углов поворота в кинематических парах рычажной системы экзоскелета. Y – множество выходных параметров методов и алгоритмов обработки информации, которыми являются углы поворота манипуляторов антропоморфного робота. Z – множество внутренних параметров системы, к которым относятся длины звеньев экзоскелета, частей руки оператора, длины звеньев манипуляторов антропоморфного робота. Q – множество показателей качества/точности функционирования системы.

Необходимо разработать метод оценки Q в диапазоне значений входных параметров X системы, за счет изменения формирования выходных параметров Y на основе входных параметров X и внутренних параметров системы Z , при ограничениях на входные параметры $X \subseteq X_{\text{доп}}$.

Формальная постановка научной задачи имеет вид: необходимо разработать метод оценки Q такой, что:

$$Q: \langle S, X, Z \rangle \rightarrow y | y \in Y, \forall \Delta q_j(y) > 0, i = 1 \dots n, j = 1 \dots |Q|, \quad (29)$$

$$X = \langle \theta'_i | i = 1 \dots 7 \rangle \subseteq X_{\text{доп}}, \quad (30)$$

$$Y = \langle \theta''_i | i = 1 \dots 7 \rangle, \quad (31)$$

$$Z = \langle l_1, l_2, l_3, l'_1, l'_2, l'_3, l \rangle, \quad (32)$$

$$Q = \langle q_i | i = 1 \dots |Q| \rangle, \quad (33)$$

$$\Delta q_j(y) = q_j^{\text{н}}(y) - q_j^{\text{д}}(y), j = 1 \dots |Q|, \quad (34)$$

где θ'_i – i -й угол поворота рычажной системы экзоскелета; $X_{\text{доп}}$ – множество допустимых значений входных параметров; θ''_i – расчетное значение i -го угла поворота манипулятора антропоморфного робота; $l_1, l_2, l_3, l'_1, l'_2, l'_3, l$ – обозначения для звеньев; $q_j^{\text{н}}(y)$ – значения критериев точности выполнения целевых операций до использования метода; $q_j^{\text{д}}(y)$ – значения критериев точности выполнения целевых операций до использования метода.

2.1.2 Метод оценки точности копирующего управления

Абстрактное подобие положений рук оператора и манипуляторов АР может быть реализовано различными способами. Подобие может быть достигнуто за счет одинаковых углов поворота в суставах руки оператора и сочленениях манипулятора АР [72]. Однако такой способ приводит к проблемам точности повторения движений. Суть предлагаемого метода заключается в выборе иных параметров, значения которых должны совпадать у руки оператора и манипулятора АР для подобия их положений.

Рассмотрим требование максимизации задействованного рабочего пространства манипулятора АР. Рука оператора и манипулятора АР в общем случае могут иметь различные длины. Очевидно, что положению руки оператора, в котором она полностью выпрямлена, должно соответствовать положению манипулятора АР, в котором он полностью выпрямлен. В случае, если при полном выпрямлении руки оператора манипулятор АР выпрямлен не полностью, возникает недоиспользование рабочего пространства манипулятора АР. В случае, если манипулятор АР выпрямлен при согнутой руке оператора, возникают зоны движения руки оператора, в которых манипулятор АР не реагирует на него, т. к. достигнут предел рабочего пространства манипулятор АР.

Примем в качестве начала координат для каждой руки оператора (манипулятора АР, соответственно) центр плечевого сустава (сочленения). Обозначим радиус-вектор центра кисти оператора как \mathbf{r} (рис. 17), а радиус-вектор центра схвата манипулятора АР как \mathbf{r}' . Пусть максимальные значения их модулей соответственно равны r_m и r'_m . В качестве частного критерия максимизации использования рабочего пространства манипулятора АР предлагается использовать следующее соотношение:

$$k_r = \left| \frac{|\mathbf{r}|}{r_m} - \frac{|\mathbf{r}'|}{r'_m} \right|. \quad (35)$$

Данный критерий позволяет использовать степени выпрямления руки оператора и манипулятора АР (рис. 17) и не зависит от соотношения между плечом и предплечьем, что позволяет обойти несоответствие кинематических параметров манипулятора АР и антропометрических параметров различных операторов.

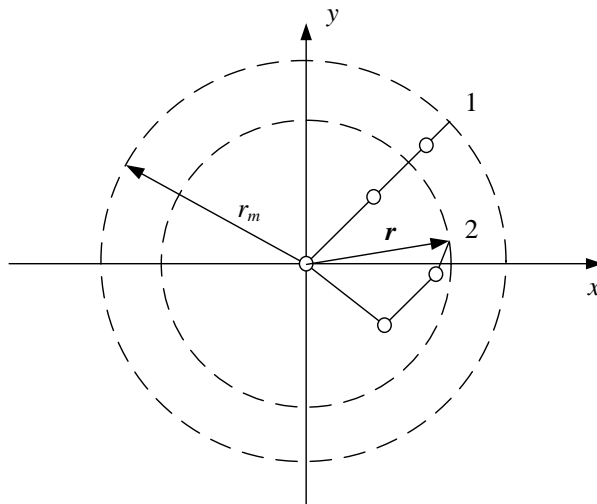


Рисунок 17 – Радиус-вектор центра кисти оператора: 1 – максимально выпрямленная рука оператора; 2 – согнутая рука оператора

При точном копирующем управлении частный критерий k_r должен иметь нулевое значение.

Для человекоподобия движений манипуляторов АР радиус-вектор r' центра схвата манипулятора АР помимо пропорциональности радиус-вектору r центра кисти оператора должен иметь сходное с ним направление. Направление вектора в пространстве задается двумя углами в сферической системе координат. В качестве таких углов удобно использовать азимутальный угол φ и зенитный угол ϑ (рис. 18).

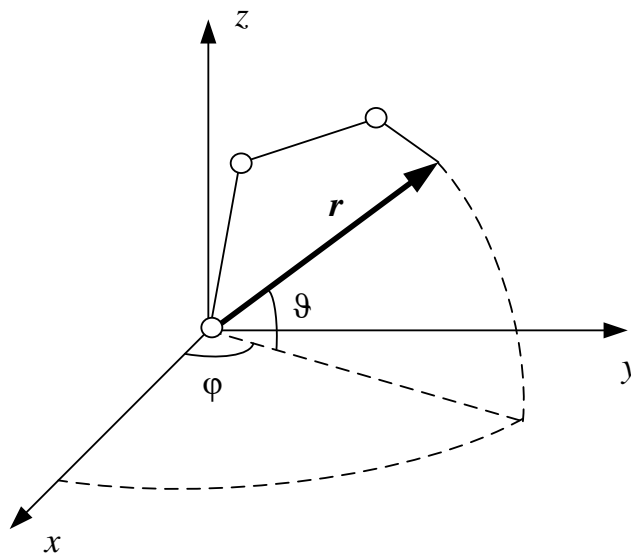


Рисунок 18 – Координаты радиус-вектора r в сферической системе координат

Для человекоподобия зенитный угол ϑ радиус-вектора r центра кисти оператора и зенитный угол ϑ' радиус-вектора r' центра схвата манипулятора АР должны совпадать.

Совпадение азимутальных углов радиус-векторов r и r' соответствует требованию подобия положений рук оператора и манипуляторов АР, но удовлетворяет требованию отсутствия столкновений звеньев манипулятора АР не во всех областях рабочего пространства. В области 1 на рисунке 19 азимутальные углы могут совпадать без угрозы столкновения звеньев манипулятора АР. Таким образом обеспечивается совпадение характерных движений оператора и антропоморфного робота – руки в стороны, руки вверх, руки вперед.

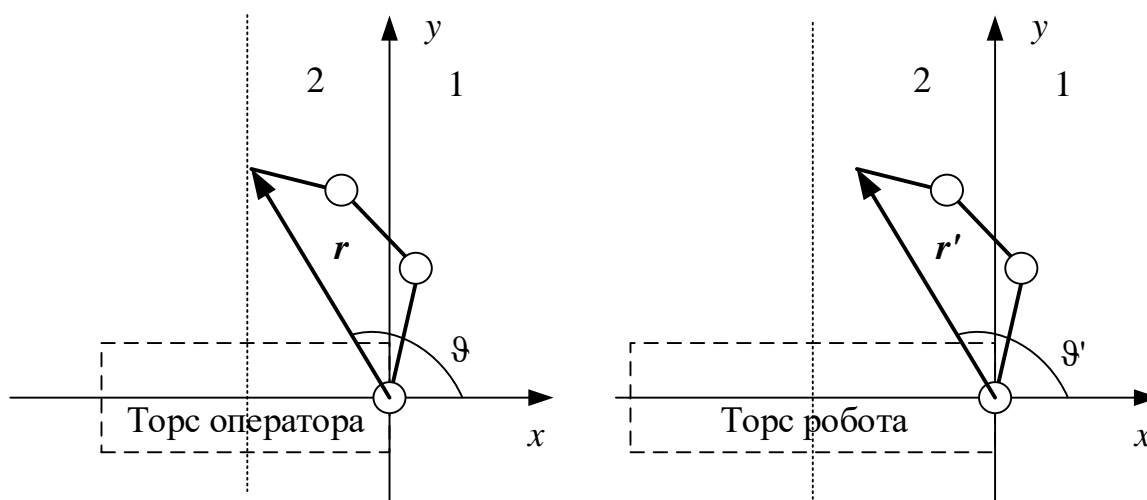


Рисунок 19 – Азимутальные углы радиус-векторов r и r'

В общем случае значение ширины плеч человека m и ширины плеч робота m' отличаются. Данные отличия влекут за собой проблемы при использовании совпадения азимутальных углов φ и φ' в области 2 на рисунке 19. Предположим, что оператор сведет руки ладонь к ладони так, чтобы плоскость касания лежала в сагитальной плоскости. Если ширина плеч робота m' больше, чем ширина плеч оператора m , то модуль азимутального угла манипулятора АР φ' должен быть больше, чем модуль азимутального угла руки оператора φ . В противном случае, когда оператор сведет ладони, между схватами робота останется зазор. В таком случае сведение манипулятора АР станет невозможным. И наоборот, если ширина плеч робота m' меньше, чем ширина плеч оператора m , то при сведении рук оператором робот сведет манипуляторы раньше, чем оператор. Поэтому предлагается принять в качестве точного следующее значение азимутального угла:

$$\varphi' = \begin{cases} \varphi, & \text{если } \varphi < \frac{\pi}{2}, \\ c_3\varphi^3 + c_2\varphi^2 + c_1\varphi + c_0, & \text{если } \varphi \geq \frac{\pi}{2}, \end{cases} \quad (36)$$

где: c_i – коэффициенты многочлена, определяемые эмпирическим путем на

основе оценок эргономичности для конкретной системы копирующего управления.

В области 1 на рисунке 19 азимутальный угол руки оператора Φ и азимутальный угол манипулятора АР Φ' равны. В области 2 на рисунке 19 обеспечивается гладкий переход к нелинейной зависимости азимутальных углов, обеспечивающей одновременное сведение рук оператора и манипуляторов АР.

Требование отсутствия столкновения звеньев манипулятора АР может быть удовлетворено за счет полного и однозначного контроля манипулятора АР рукой оператора. Радиус-вектор центра кисти r (схвата r') задает положение только лучезапястного сустава (сочленения), но не позволяет однозначно определить положение локтевого сустава (сочленения) вследствие кинематической избыточности манипулятора АР. Для предупреждения столкновений манипулятора АР с объектами среды и человекоподобия его движений предлагается принять точным совпадение углов Эйлера для треугольников, образованных плечевым, локтевым и лучезапястным суставами (сочленениями) руки оператора и манипулятора АР. При использовании углов Эйлера для поворота по осям z - y - x азимутальный угол Φ и зенитный угол ϑ соответствуют повороту по осям z - y , а третий угол вращения Ψ описывает поворот локтевого сустава руки оператора вокруг оси x , т. е. вокруг радиус-вектора r центра схвата. В рамках предлагаемого метода в качестве частных критериев точности копирующего управления могут использоваться абсолютные отклонения углов Эйлера Φ' , ϑ' , Ψ' части манипулятора АР до лучезапястного сочленения (транспортной части) от аналогичных углов Эйлера Φ , ϑ , Ψ руки оператора:

$$k_{\Phi} = |\Phi - \Phi'|, k_{\vartheta} = |\vartheta - \vartheta'|, k_{\Psi} = |\Psi - \Psi'|. \quad (37)$$

С помощью ПДХ углы Эйлера части руки оператора (манипулятора АР) до лучезапястного сустава (сочленения) могут быть найдены по формулам [74]:

$$\varphi = \text{atan2}(a_x, -a_y), \quad (38)$$

$$\vartheta = \text{atan2}(-s_x \cos \varphi - s_y \sin \varphi, n_x \cos \varphi + n_y \sin \varphi) \quad (39)$$

$$\psi = \text{atan2}(a_x \sin \alpha_i - a_y \cos \alpha_i, a_z), \quad (40)$$

где: $\mathbf{a}, \mathbf{s}, \mathbf{n}$ – вектор столбцы матрицы \mathbf{R}_3 .

Исходя из требований подобия движений руки оператора и манипулятора АР, а также совпадения характерных положений руки оператора и манипулятора АР, необходимо обеспечить совпадение ориентации кисти оператора и схвата манипулятора АР. Выполнение данного условия необходимо для корректного захвата и манипулирования объектами. Пусть α, β, γ – углы Эйлера кисти оператора, а α', β', γ' – углы Эйлера схвата манипулятора АР при вращении вокруг осей $z-y-x$ относительно базовой системы координат. Тогда в качестве частных критериев оценки точности копирующего управления могут использоваться модули разности этих углов:

$$k_\alpha = |\alpha - \alpha'|, k_\beta = |\beta - \beta'|, k_\gamma = |\gamma - \gamma'|. \quad (41)$$

В качестве общего критерия оценки точности может использоваться модуль вектора ошибки, вычисляемый по формуле:

$$k = \sqrt{w_r^2 k_r^2 + w_\varphi^2 k_\varphi^2 + w_\vartheta^2 k_\vartheta^2 + w_\psi^2 k_\psi^2 + w_\alpha^2 k_\alpha^2 + w_\beta^2 k_\beta^2 + w_\gamma^2 k_\gamma^2}, \quad (42)$$

где: k – общий критерий точности копирующего управления для отдельного положения; $k_r, k_\varphi, k_\vartheta, k_\psi, k_\alpha, k_\beta, k_\gamma$ – частные критерии точности копирующего управления; $w_r, w_\varphi, w_\vartheta, w_\psi, w_\alpha, w_\beta, w_\gamma$ – весовые коэффициенты частных критериев точности копирующего управления.

Значимость частных критериев определяется с помощью вектора весовых коэффициентов $\mathbf{w} = \{w_r, w_\varphi, w_\vartheta, w_\psi, w_\alpha, w_\beta, w_\gamma\}$. В простейшем случае все элементы вектора \mathbf{w} имеют единичное значение и нужны для согласования размерности частных критериев. В более сложном случае весовые коэффициенты могут быть оптимизированы на основе экспертной оценки точности копирующего управления оператором.

На основе общего критерия k для отдельного положения может быть найден интегральный критерий K точности копирующего управления на всём конфигурационном пространстве возможных положений руки оператора:

$$K = \frac{\int k(\boldsymbol{\theta}) d\boldsymbol{\theta}}{\int d\boldsymbol{\theta}}. \quad (43)$$

В реальных приложениях различные векторы обобщенных координат $\boldsymbol{\theta}$ руки оператора имеют разную вероятность появления, поэтому интегральный критерий точности копирующего управления может быть уточнен за счет введения вероятности того или иного положения руки оператора:

$$K = \frac{\int k(\boldsymbol{\theta}) p(\boldsymbol{\theta}) d\boldsymbol{\theta}}{\int d\boldsymbol{\theta}}, \quad (44)$$

где: $p(\boldsymbol{\theta})$ – вероятность нахождения руки оператора в положении $\boldsymbol{\theta}$.

Нулевое значение интегрального критерия точности копирующего управления K означает, что система, для которой он вычислен, является точной с точки зрения предложенных частных критериев оценки во всём операционном пространстве руки оператора. Чем сильнее значение интегрального критерия K отклоняется от нулевого значения, тем сильнее система копирующего управления отличается от точного.

2.1.3 Проверка работоспособности метода

Для проверки работоспособности предложенного метода оценки точности копирующего управления манипуляторами АР выполним их сравнительный анализ с аналогом на численных примерах. В [73] в качестве целевых углов поворота манипулятора АР $\boldsymbol{\theta}'$ предлагается использовать углы поворота экзоскелета $\boldsymbol{\theta}''$. В работе [75] развивается способ, описанный в [73], и предложен метод, позволяющая рассчитать углы поворота руки оператора $\boldsymbol{\theta}$ на основе углов поворота экзоскелета $\boldsymbol{\theta}''$. С точки зрения этого способа точным является копирующее управление, при котором выполняется равенство $\boldsymbol{\theta}' = \boldsymbol{\theta}$. Так как в затрагивающих тему работах [75-81] отсутствуют явные методы

оценки точности копирующего управления, можно провести только качественное сравнение. Для этого проведено два вычислительных эксперимента. Результаты проведенных вычислительных экспериментов приведены в таблице 4.

В первом вычислительном эксперименте входные данные подобраны так, чтобы копирующее управление было оптимальным с точки зрения неявных критериев способа-аналога, т. е. $\theta_i' - \theta_i = 0, i = [1, 7]$ (табл. 4).

Таблица 4 – Результаты численного эксперимента

Эксперимент 1. Положение манипулятора АР, точное с точки зрения критерия равенства углов поворота руки оператора и манипулятора АР									
$m=38$ см, $m''=36$, см									
i	a_i , см	d_i , см	α_i , °	a_i'' , см	d_i'' , см	α_i'' , °	θ_i , °	θ_i'' , °	$\theta_i'' - \theta_i$, °
1	0,0	0,0	90,0	0,0	0,0	90,0	161,2	161,2	0,0
2	0,0	0,0	90,0	0,0	0,0	90,0	-86,4	-86,4	0,0
3	0,0	-34,0	90,0	0,0	-34,0	90,0	-133,3	-133,3	0,0
4	0,0	0,0	90,0	0,0	0,0	90,0	-102,0	-102,0	0,0
5	0,0	31,0	90,0	0,0	34,0	90,0	-92	-92	0,0
6	0,0	0,0	90,0	0,0	0,0	90,0	-45,3	-45,3	0,0
7	-8,0	0,0	0,0	-8,0	0,0	0,0	11,4	11,4	0,0
Эксперимент 2. Положение МАР, точное с точки зрения предложенного метода оценки точности выполнения целевых операций									
$m=38$ см, $m''=36$, см									
i	a_i , см	d_i , см	α_i , °	a_i'' , см	d_i'' , см	α_i'' , °	θ_i , °	θ_i'' , °	$\theta_i'' - \theta_i$, °
1	0,0	0,0	90,0	0,0	0,0	0,0	161,2	161,9	0,7
2	0,0	0,0	90,0	0,0	0,0	0,0	-86,4	-86,5	0,1
3	0,0	-34,0	90,0	0,0	-34,0	0,0	-133,3	-132,1	1,2
4	0,0	0,0	90,0	0,0	0,0	0,0	-102,0	-102,2	0,2
5	0,0	31,0	90,0	0,0	34,0	0,0	-92,0	92,0	0,0
6	0,0	0,0	90,0	0,0	0,0	0,0	-45,3	-45,2	0,1
7	-8,0	0,0	0,0	-8,0	0,0	0,0	11,4	11,1	0,3

Результаты визуализации первого вычислительного эксперимента приведены на рисунке 20. Параметры манипулятора АР m' и d_i' отличаются от параметров руки оператора m и d_i всего на несколько сантиметров. Однако для положения рук оператора на рис. 18.а точным с точки зрения критериев метода-аналога является гипотетическое положение манипулятора АР, изображенное на рисунке 18.б. Данное положение является недопустимым вследствие

столкновения звеньев манипулятора АР. С точки зрения предложенного метода, данное положение не является точным, т. к. частные критерии k_r , k_ϕ , k_θ и k_ψ имеют ненулевое значение (табл. 4), что свидетельствует об их адекватности на исходных данных вычислительного эксперимента.

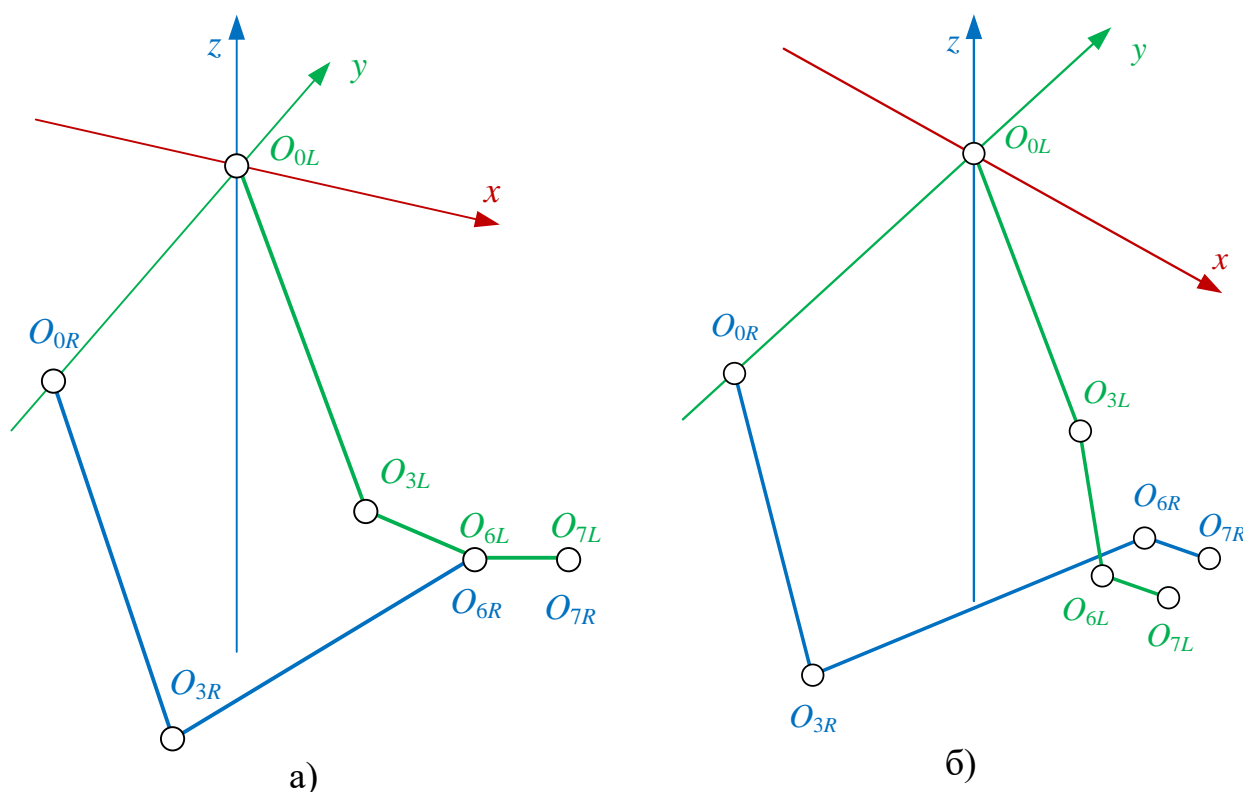


Рисунок 20 – Результаты первой проверки работоспособности эксперимента: а) положение рук оператора; б) положение МАР. Буквы «L» и «R» в нижних индексах обозначают левую и правую руку, соответственно

Во втором вычислительном эксперименте входные данные подобраны так, чтобы копирующее управление было точным с точки зрения предложенных в рамках метода критериев, т. е. чтобы критерии k_r , k_ϕ , k_θ , k_ψ , k_α , k_β и k_γ принимали нулевое значение (табл. 4). Результаты визуализации второго вычислительного эксперимента приведены на рисунке 21. Не смотря на то, что параметры манипулятора АР m' и d_i' как и в первом эксперименте отличаются от параметров руки оператора m и d_i , положению рук оператора

на рисунке 21.а соответствует положение манипулятора АР, изображенное на рисунке 21.б. Как видно из рисунка 21.б, в положении МАР, точном с точки зрения предложенного метода, «выпрямленность» манипулятора АР пропорциональна «выпрямленности» руки оператора; кисти манипулятора АР параллельны кистям оператора; плоскости, образованные плечевыми, локтевыми и лучезапястными сочленениями манипулятора АР, параллельным соответствующим плоскостям рук оператора), что свидетельствует работоспособности предложенного метода на исходных данных вычислительного эксперимента. В то же время такое положение манипулятора АР не является точным с точки зрения метода-аналога, $\theta_i' - \theta_i \neq 0, i = [1, 7]$ (табл. 4).

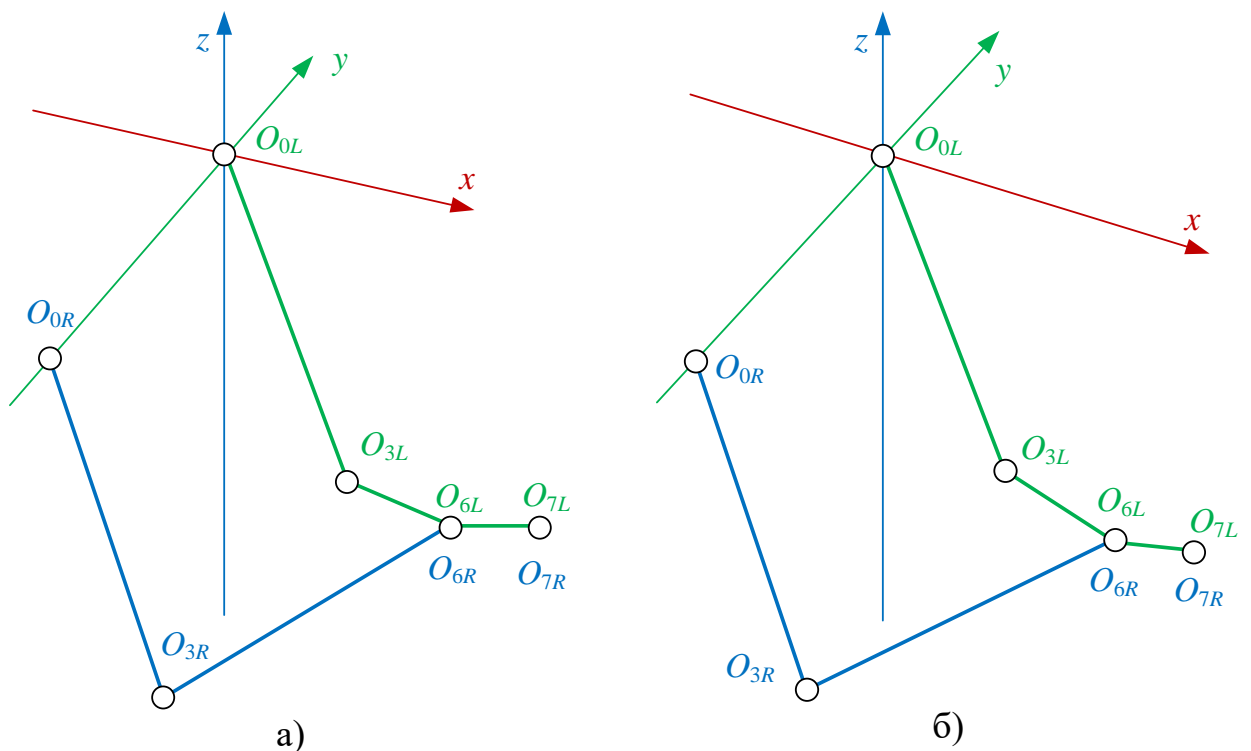


Рисунок 21 – Результаты второй проверки работоспособности эксперимента:
а) положение рук оператора; б) положение манипулятора АР. Буквы «L» и «R»
в нижних индексах обозначают левую и правую руку, соответственно

Результаты проведенных вычислительных экспериментов свидетельствуют о большей точности предложенного метода по сравнению с

существующим аналогом. Предложенный метод оценки точности копирующего управления позволяет учитывать общий случай, когда кинематические параметры руки оператора и манипулятора АР отличаются. Использование масштабирования и перерасчёта значения критериев точности копирующего управления позволяет исключить проблемы, возникающие при использовании существующего метода в некоторых характерных положениях. Предложенный метод позволяет выполнить количественное сравнение точности копирующего управления при анализе альтернативных научно-технических решений в области копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота.

2.2 Разработка обобщенного алгоритма обработки информации с экзоскелетного комплекса для повышения точности выполнения целевых операций

Разработка обобщенного алгоритма обработки информации обусловлена необходимостью повышения точности выполнения целевых операций за счет внедрения в процесс КУ научных решений, обоснованных в первой главе диссертации и предлагаемых далее в диссертации:

- предлагается осуществлять копирование движений оператора манипулятором антропоморфного робота не по углам поворота, а по искусственным параметрам, введенным в методе оценки точности выполнения целевых операций;

- предлагается рассчитывать искусственные параметры положения руки оператора не на основе углов поворота в кинематических парах рычажной системы ЭК, а на основе значений углов поворота руки оператора, рассчитанных с помощью специального математического обеспечения на основе метода расчёта углов поворота руки оператора на основе углов поворота в кинематических парах рычажной системы ЭК.

С учетом предложенных изменений блок-схема обобщенный алгоритм обработки информации принимает вид, изображенный на рисунке 22.



Рисунок 22 – Обобщенный алгоритм обработки информации

Разработка обобщенного алгоритма обработки информации заключается во введении процедуры расчёта углов поворота руки оператора на основе углов

поворота в кинематических парах рычажной системы ЭК и процедуры расчёта искусственных параметров положения руки оператора.

2.3 Разработка алгоритма расчета углов поворота руки оператора на основе информации об углах поворота рычажной системы экзоскелетного комплекса

Обоснование зависимости углов поворота рычажного механизма задающего устройства с избыточной подвижностью позволяет применять методы решения задач кинематики для расчета обобщенных координат руки оператора. Обобщенные координаты руки оператора рассчитываются на основе информации обобщенных координат экзоскелетного комплекса и методов решения задач кинематики [82-85].

Предлагаемый алгоритм расчета обобщенных координат руки оператора состоит из 3 укрупненных этапов: калибровки, решения прямой задачи кинематики, решения обратной задачи кинематики. Схема алгоритма приведена на рисунке 23.

Рассмотрим подробнее содержание этапов.

На подэтапе 1.1 определяются координаты точки $A(x_A, y_A, z_A)$. Предполагается, что точка плеча человека A_q является началом координат, т. е. $A_q = (0; 0; 0)$, тогда:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{A_q A} &= \{l_{AAq} \cdot \cos(\alpha_{AAq}), l_{AAq} \cdot \cos(\beta_{AAq}), l_{AAq} \cdot \cos(\gamma_{AAq})\} = \\ &= \{A_q A_x, A_q A_y, A_q A_z\}, \end{aligned} \quad (45)$$

$$T_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & A_q A_x \\ 0 & 1 & 0 & A_q A_y \\ 0 & 0 & 1 & A_q A_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow A = T_A \cdot A_q, \quad (46)$$

где l_{AAq} – фиксированное расстояние между точками A и A_q ; α_{AAq} , β_{AAq} , γ_{AAq} – направляющие углы $\overrightarrow{A_q A}$.

Этап 1. Калибровка. Расчет декартовых координат экзоскелетного комплекса

- 1.1 Определение координат точки плеча $A(x_A, y_A, z_A)$.
- 1.2 Определение смещения точки C относительно лучезапястного сустава человека C_q .
- 1.3 Определение смещения точки D относительно окончания кисти человека D_q .

Этап 2. Расчет декартовых координат руки оператора на основе решения прямой задачи кинематики

- 2.1 Измерение углов ориентации звеньев 1-3.
- 2.2 Вычисление координат точек B, C, D .

Этап 3. Расчет обобщенных координат (углов поворота) руки оператора на основе решения обратной задачи кинематики

- 3.1 Определение координат точек C_q и D_q .
- 3.2 Расчет угла β_{B_q} из длин векторов $\overline{A_q B_q}$ и $\overline{B_q C_q}$.
- 3.3 Конкретизация уравнения окружности, описываемой точкой B_q при вращении вокруг прямой $A_q C_q$.
- 3.4 Выбор положений точки B_q^* на окружности из условия нахождения общих точек пересечения со сферой $(B; BB_q)$.
- 3.5 Определение углов поворота руки оператора путем решения обратной задачи кинематики.

Рисунок 23 – Схема алгоритма расчета обобщенных координат руки оператора на основе информации обобщенных координат экзоскелетного комплекса

Здесь и далее α – угол, отсчитываемый от оси абсцисс, β – от оси ординат, γ – от оси аппликат.

На подэтапе 1.2 определяется смещение $\overline{CC_q}$ точки лучезапястного сустава оператора $C_q(x_{C_q}, y_{C_q}, z_{C_q})$ относительно точки $C(x_C, y_C, z_C)$:

$$\begin{aligned} \overline{CC_q} &= \{l_{CC_q} \cdot \cos(\alpha_{CC_q}), l_{CC_q} \cdot \cos(\beta_{CC_q}), l_{CC_q} \cdot \cos(\gamma_{CC_q})\} = \\ &= \{CC_{C_q x}, CC_{C_q y}, CC_{C_q z}\}, \end{aligned} \quad (47)$$

$$T_{C_q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & CC_{C_q x} \\ 0 & 1 & 0 & CC_{C_q y} \\ 0 & 0 & 1 & CC_{C_q z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow C_q = T_{C_q} \cdot C, \quad (48)$$

где l_{CC_q} – фиксированное расстояние между точками C и C_q ; α_{CC_q} , β_{CC_q} , γ_{CC_q} – направляющие углы $\overline{CC_q}$.

На подэтапе 1.3 определяется смещение точки D рабочего окончания копирующего устройства относительно кисти человека D_q . В зависимости от приложения данного способа определения положения руки оператора, $D(x_D, y_D, z_D)$ и $D_q(x_{D_q}, y_{D_q}, z_{D_q})$ могут приниматься совпадающими (смещение равно нулю). В противном случае смещение может быть найдено по формулам:

$$\overrightarrow{DD_q} = \{l_{DD_q} \cdot \cos(\alpha_{DD_q}), l_{DD_q} \cdot \cos(\beta_{DD_q}), l_{DD_q} \cdot \cos(\gamma_{DD_q})\} = \{DD_{q_x}, DD_{q_y}, DD_{q_z}\}, \quad (49)$$

$$T_{D_q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & DD_{q_x} \\ 0 & 1 & 0 & DD_{q_y} \\ 0 & 0 & 1 & DD_{q_z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow D_q = T_{D_q} \cdot D, \quad (50)$$

где l_{DD_q} – фиксированное расстояние между точками D и D_q ; $\alpha_{DD_q}, \beta_{DD_q}, \gamma_{DD_q}$ – направляющие углы $\overrightarrow{DD_q}$.

На втором этапе алгоритма используется решение прямой задачи кинематики для вычисления координат точек B, C, D . Способ решения прямой задачи кинематики подробно описан в разделе 8 настоящего отчета.

На подэтапе 2.1 выполняется процедура измерения углов ориентации звеньев 1-3. В устройство копирующего типа встроены датчики регистрации углов поворота звеньев, таким образом, направляющие углы $\alpha_{AB}, \alpha_{BC}, \alpha_{CD}$ (от оси абсцисс), $\beta_{AB}, \beta_{BC}, \beta_{CD}$ (от оси ординат), $\gamma_{AB}, \gamma_{BC}, \gamma_{CD}$ (от оси аппликат) звеньев AB, BC, CD можно получить путем косвенных измерений и считать известными.

На подэтапе 2.2 производится вычисление координат точек B, C, D , путем решения прямой задачи кинематики аналогично формулам (11), (12).

Координаты точки B :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{AB} &= \{l_{AB} \cdot \cos(\alpha_{AB}), l_{AB} \cdot \cos(\beta_{AB}), l_{AB} \cdot \cos(\gamma_{AB})\} = \\ &= \{AB_x, AB_y, AB_z\}, \end{aligned} \quad (51)$$

$$T_B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & AB_x \\ 0 & 1 & 0 & AB_y \\ 0 & 0 & 1 & AB_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow B = T_B \cdot A. \quad (52)$$

Координаты точки C :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{BC} &= \{l_{BC} \cdot \cos(\alpha_{BC}), l_{BC} \cdot \cos(\beta_{BC}), l_{BC} \cdot \cos(\gamma_{BC})\} = \\ &= \{BC_x, BC_y, BC_z\}, \end{aligned} \quad (53)$$

$$T_C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & BC_x \\ 0 & 1 & 0 & BC_y \\ 0 & 0 & 1 & BC_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow C = T_C \cdot B. \quad (54)$$

Координаты точки D :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{CD} &= \{l_{CD} \cdot \cos(\alpha_{CD}), l_{CD} \cdot \cos(\beta_{CD}), l_{CD} \cdot \cos(\gamma_{CD})\} = \\ &= \{CD_x, CD_y, CD_z\}, \end{aligned} \quad (55)$$

$$T_D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & CD_x \\ 0 & 1 & 0 & CD_y \\ 0 & 0 & 1 & CD_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow D = T_D \cdot C. \quad (56)$$

На третьем этапе производится решение обратной задачи кинематики для определения пространственного положения суставов руки оператора.

2.4 Разработка специального математического обеспечения алгоритма обработки информации с экзоскелетного комплекса для расчета положения локтевого сустава руки оператора при копирующем управлении

2.4.1 Постановка задачи разработки специального математического обеспечения алгоритма обработки информации

Третий этап алгоритма расчета обобщенных координат руки оператора на основе информации обобщенных координат ЭК является специальным математическим обеспечением алгоритма обработки информации для расчета

положения локтевого сустава руки оператора при копирующем управлении с экзоскелетного комплекса. Математическое обеспечение представлено авторским методом расчета положения центра локтевого сустава руки оператора и выбора пространственного положения локтевого узла манипулятора [75, 83-87].

Целью метода расчёта положения центра локтевого сустава руки оператора является повышение точности выполнения целевых операций за счёт расчёта уточненных значений углов поворота руки.

Примем следующие обозначения: S – система копирующего управления; X – множество входных параметров метода, в качестве которых выступают углы поворота рычажной системы экзоскелета; Y – множество выходных параметров метода, в качестве которых выступают углы поворота руки оператора; Z – множество внутренних параметров системы, к которым относятся длины звеньев экзоскелета и частей руки оператора; Q – множество показателей качества/точности функционирования системы.

Необходимо разработать метод M повышения точности выполнения целевых операций по критериям Q в диапазоне значений входных параметров X системы, за счет изменения формирования выходных параметров Y на основе входных параметров X и внутренних параметров системы Z , при ограничениях на значения параметров среды $X \subseteq X_{\text{доп}}$.

Формальная постановка научной задачи имеет вид: необходимо разработать метод M такой, что:

$$M: \langle S, X, Z \rangle \rightarrow y | y \in Y, \forall \Delta q_j(y) > 0, i = 1 \dots n, j = 1 \dots |Q|, \quad (57)$$

$$X = \langle \theta'_i | i = 1 \dots 7 \rangle \subseteq X_{\text{доп}}, \quad (58)$$

$$Y = \langle \theta_i | i = 1 \dots 7 \rangle, \quad (59)$$

$$Z = \langle l_1, l_2, l_3, l'_1, l'_2, l'_3, l \rangle, \quad (60)$$

$$Q = \langle q_i | i = 1 \dots |Q| \rangle, \quad (61)$$

$$\Delta q_j(y) = q_j^{\text{н}}(y) - q_j^{\text{д}}(y), j = 1 \dots |Q|, \quad (62)$$

где θ'_i – i -й угол поворота рычажной системы экзоскелета; $X_{\text{доп}}$ – множество

допустимых значений входных параметров; θ_i – расчетное значение i -го угла поворота руки оператора; $l_1, l_2, l_3, l'_1, l'_2, l'_3, l$ – обозначения для звеньев; $q_j^{\Delta}(y)$ – значения критериев точности выполнения целевых операций до использования метода; $q_j^{\Delta}(y)$ – значения критериев точности выполнения целевых операций до использования метода.

2.4.2 Метод расчета положения центра локтевого сустава руки оператора и выбора пространственного положения локтевого узла манипулятора

Третий этап алгоритм расчета обобщенных координат руки оператора на основе информации обобщенных координат экзоскелетного комплекса является авторским методом расчета положения центра локтевого сустава руки оператора и выбора пространственного положения локтевого узла манипулятора.

На подэтапе 3.1 выполняется вычисление координат точек $C_q(x_{C_q}, y_{C_q}, z_{C_q})$ и $D_q(x_{D_q}, y_{D_q}, z_{D_q})$ по формулам (41), (43).

На подэтапе 3.2 производится расчет угла β_{B_q} из длин векторов $\overrightarrow{A_q B_q}$ и $\overrightarrow{B_q C_q}$. На рисунке 24 изображено расположение вычисляемого угла β_{B_q} . Рассмотрим треугольник $A_q B_q C_q$.

Длины векторов $\overrightarrow{A_q B_q}$ и $\overrightarrow{B_q C_q}$ известны, и, зная координаты точек $A_q(x_{A_q}, y_{A_q}, z_{A_q})$ и $C_q(x_{C_q}, y_{C_q}, z_{C_q})$ произведем расчет длины вектора $\overrightarrow{A_q C_q}$ по формуле:

$$l_{A_q C_q} = \sqrt{(x_{C_q} - x_{A_q})^2 + (y_{C_q} - y_{A_q})^2 + (z_{C_q} - z_{A_q})^2}. \quad (63)$$

Произведем расчет угла β_{B_q} по теореме косинусов:

$$\beta_{B_q} = \arccos\left(\frac{l_{A_q B_q}^2 + l_{B_q C_q}^2 - l_{A_q C_q}^2}{2l_{A_q B_q}l_{B_q C_q}}\right). \quad (64)$$

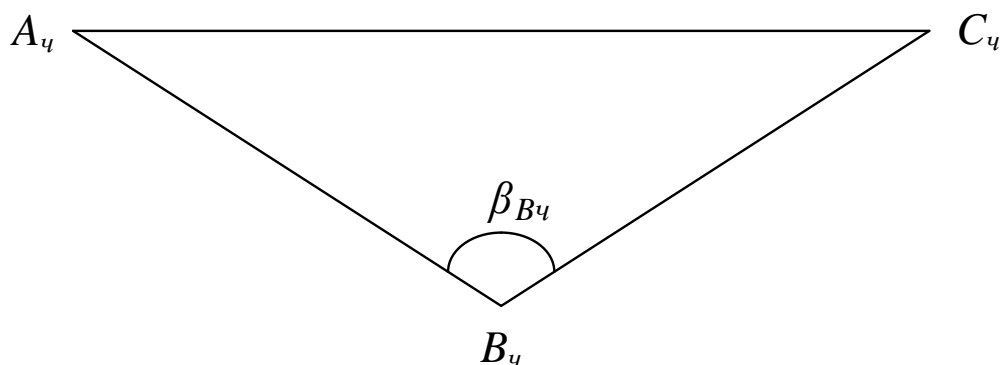


Рисунок 24 – Расположение вычисляемого угла β_{B_q}

На подэтапе 3.3 конкретизируем уравнение окружности, описываемой точкой B_q при вращении вокруг прямой A_qC_q . На рисунке 25 изображена окружность $O_q(K_q; K_qB_q)$, описываемая точкой B_q при вращении вокруг прямой A_qC_q , где K_q – точка пересечения высоты, проведенной из точки B_q к стороне A_qC_q , делящая её пополам при допущении равенства длин векторов $\overrightarrow{A_qB_q}$ и $\overrightarrow{B_qC_q}$, т.е. $A_qK_q = K_qC_q$. Расчет координат точки $K_q(x_{K_q}, y_{K_q}, z_{K_q})$ производится по формуле:

$$K_q(x_{K_q}, y_{K_q}, z_{K_q}) = K_q\left(\frac{x_{C_q} + x_{A_q}}{2}, \frac{y_{C_q} + y_{A_q}}{2}, \frac{z_{C_q} + z_{A_q}}{2}\right). \quad (65)$$

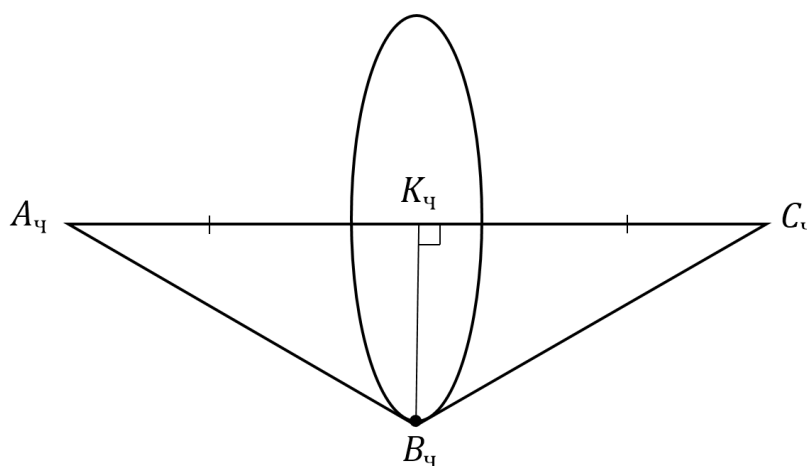


Рисунок 25 – Окружность $O_q(K_q; K_qB_q)$, описываемая точкой B_q при вращении вокруг прямой A_qC_q

Точки изображенной на рисунке 22 окружности являются множеством вариантов расположения точки B_q в пространстве, таким образом, координаты x_{B_q}, y_{B_q} точки B_q в системе координат, ось Oz которой коллинеарна с вектором $\overrightarrow{A_q C_q}$, есть множество точек уравнения окружности $O_q(K_q; K_q B_q)$:

$$(x - x_{K_q})^2 + (y - y_{K_q})^2 = K_q B_q^2. \quad (606)$$

В данной системе координат координата z_{B_q} точки B_q равна координате z_{K_q} точки K_q и равна координате z_B точки B .

На подэтапе 3.4 произведем выбор положения точки B_q^* на окружности $O_q(K_q; K_q B_q)$ из условия нахождения общих точек пересечения с сферой $(B; BB_q)$. Сфера $O_{BB_q}(B; BB_q)$ имеет центр в точке B и представлена на рисунке 26.

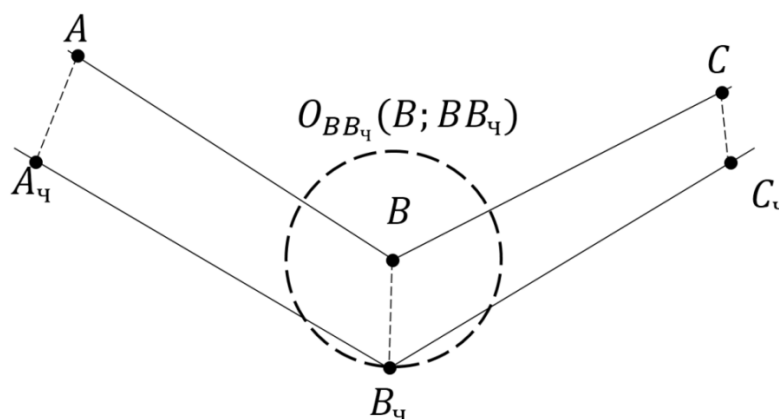


Рисунок 26 – Сфера $O_{BB_q}(B; BB_q)$

Уравнение сферы $O_{BB_q}(B; BB_q)$ имеет вид:

$$(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + (z - z_B)^2 = BB_q^2. \quad (67)$$

Учитывая, что $z_{B_q} = z_B$, уравнение (27) примет вид:

$$(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 = BB_q^2. \quad (68)$$

Таким образом, координаты x_{B_q}, y_{B_q} точки B_q^* в пространстве есть точки пересечения окружности $O_q(K_q; K_q B_q)$ со сферой $(B; BB_q)$ (рис. 27).

Таким образом, поиск возможных координат x_{B_q}, y_{B_q} точки B_q производится при решении системы нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} (x_{B_q} - x_{K_q})^2 + (y_{B_q} - y_{K_q})^2 = K_q B_q^2 \\ (x_{B_q} - x_B)^2 + (y_{B_q} - y_B)^2 = B B_q^2 \end{cases} \quad (69)$$

Выбор искомой точки B_q из 2-х возможных определяется встраиваемым условием, например, минимизация поворота звеньев исполнительного устройства, минимизация энергопотребления, выбор минимального размаха, выбор кратчайшего расстояния $B B_q$ и т.д. Таким образом, искомая точка $B_q(x_{B_q}; y_{B_q}; z_{B_q}) = B_q(x_{B_q}^*; y_{B_q}^*; z_B)$.

$$B_q = \begin{cases} B_{q1}^*, & \text{если } |B_{q0} - B_{q1}^*| < |B_{q0} - B_{q2}^*| \\ B_{q2}^*, & \text{если } |B_{q0} - B_{q1}^*| > |B_{q0} - B_{q2}^*| \end{cases}$$

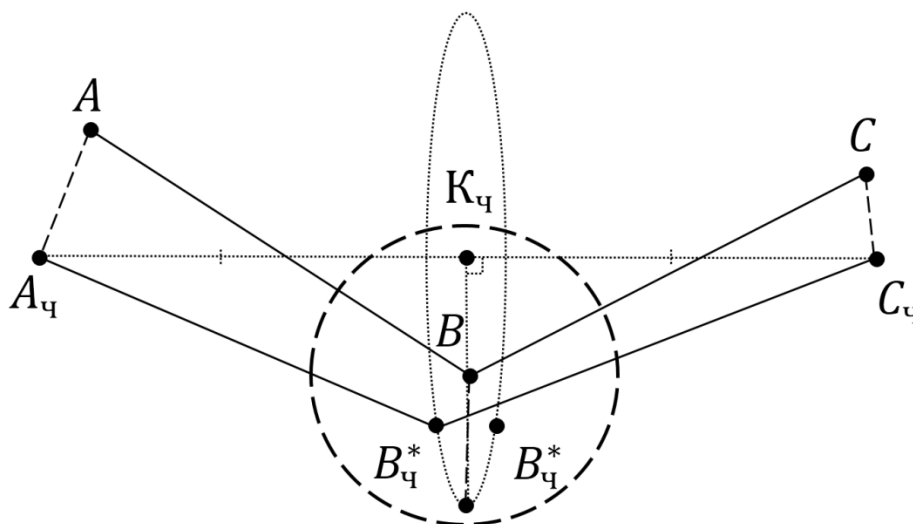


Рисунок 27 – Расположение точек B_q^* в пространстве как точки пересечения окружности $O_q(K_q; K_q B_q)$ со сферой $(B; B B_q)$

На подэтапе 3.5 определяются углы ориентации звеньев руки человека. Координаты точек руки человека $A_q(x_{A_q}, y_{A_q}, z_{A_q})$; $B_q(x_{B_q}, y_{B_q}, z_{B_q})$; $C_q(x_{C_q}, y_{C_q}, z_{C_q})$; $D_q(x_{D_q}, y_{D_q}, z_{D_q})$ определены согласно подэтапам схемы способа решения обратной задачи кинематики для определения пространственного положения суставов руки оператора: 1.1; 3.4; 3.1; 1.2 соответственно.

Зная координаты всех узловых точек руки человека, для определения пространственного положения суставов руки оператора, определение углов

ориентации руки человека возможно по классическим формулам решения задачи кинематики.

2.4.3 Оценка вычислительной сложности специального математического обеспечения обобщенного алгоритма

Для оценки вычислительной сложности разработанного метода обработки информации подсчитано количество выполняемых математических операций, входящих в неё алгоритмов и процедур. К таким операциям относятся:

- операция сравнения;
- операция смены знака;
- операция сложения/вычитания;
- операция умножения/деления;
- операция возведения в степень;
- операция вызова процедуры.

Для наглядности количество выполняемых операций без учета циклов и рекурсивных вызовов процедур приведено в таблице 5.

Таблица 5 – Количество операций метода

Операция	Количество
Сравнение	132
Смена знака	14
Сложение/вычитание	4750
Умножение	6929
Деление	23
Возведение в степень	26
Вызов процедуры	74
Итого	11948

Вычислительная сложность порядка 10^4 операций делает возможным использование разработанного математического обеспечения обобщенного алгоритма в системах копирующего управления, работающих в режиме реального времени.

2.5 Алгоритмы процедур расчёта углов поворота и расчёта искусственных параметров положения руки оператора

Процедура расчёта углов поворота руки оператора является алгоритмической реализацией метода расчёта углов поворота руки оператора на основе углов поворота в кинематических парах рычажной системы ЭК. Блок-схема данной процедуры представлена на рисунке 28.

Алгоритм подпроцедуры определения пространственного положения суставов руки оператора представлен на рисунке 29.



Рисунок 28 – Алгоритм процедуры расчёта углов поворота руки оператора

В процедуре расчёта искусственных параметров положения руки оператора используются искусственные параметры, введенные в диссертации при разработке метода оценки точности выполнения целевых операций манипулятором антропоморфного робота при копирующем управлении с экзоскелетного комплекса [37, 88-91]. Блок-схема данной процедуры представлена на рисунке 31.

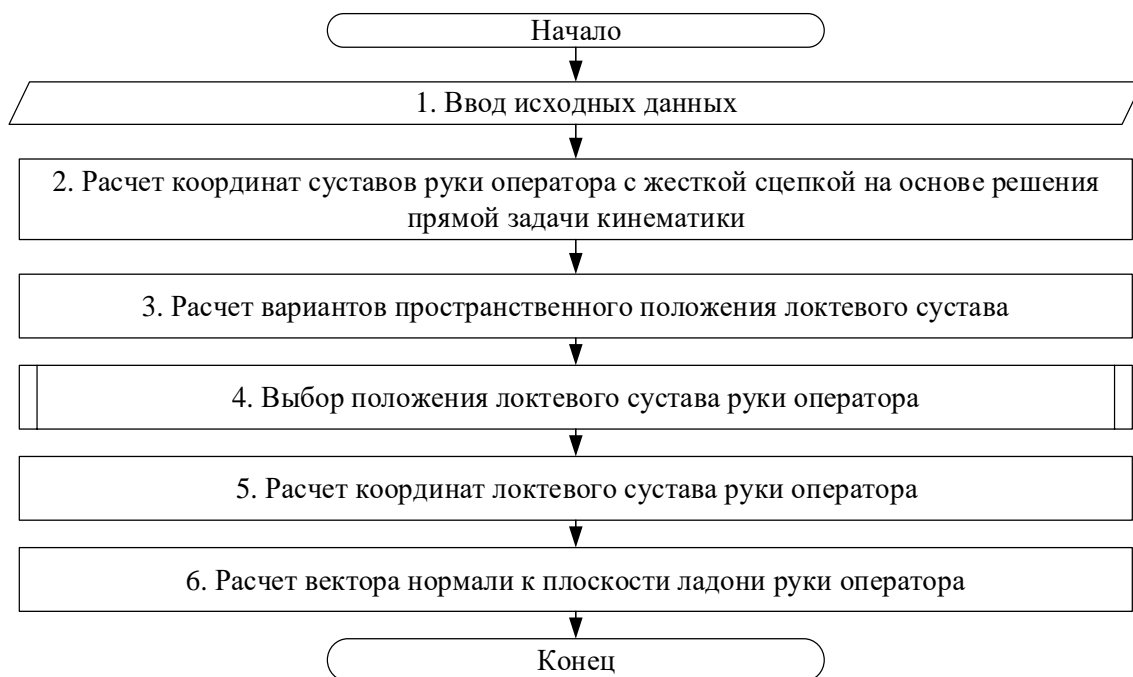


Рисунок 29 – Алгоритм подпроцедуры определения пространственного положения суставов руки оператора

Алгоритм подпроцедуры выбора положения локтевого сустава руки оператора представлен на рисунке 30.

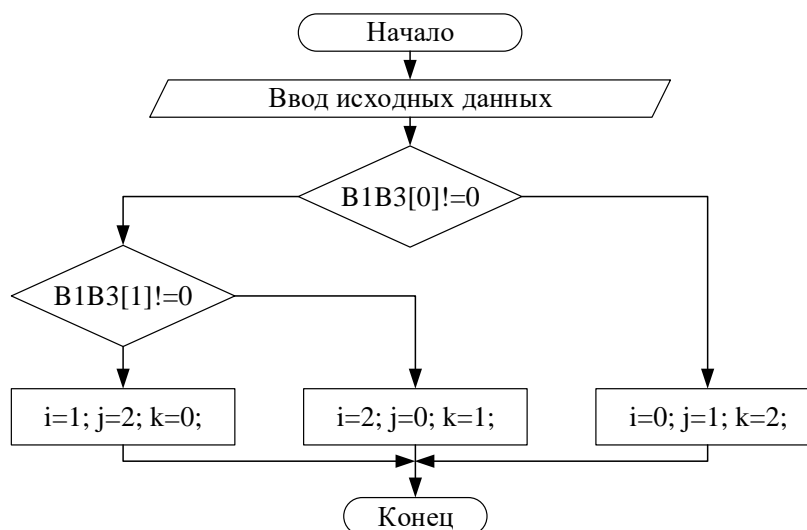


Рисунок 30 – Алгоритм подпроцедуры выбора положения локтевого сустава руки оператора

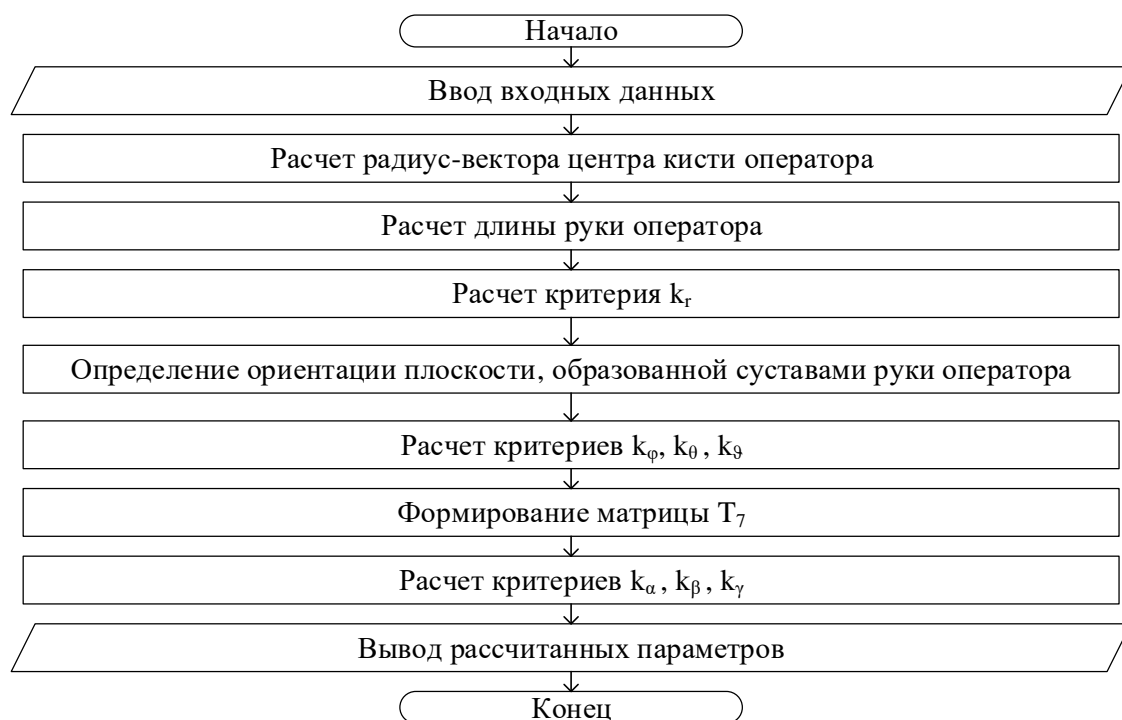


Рисунок 31 – Алгоритм процедуры расчёта искусственных параметров положения руки оператора

Выполненная разработка обобщенного алгоритма обработки информации позволяет выполнить разработку специального математического и алгоритмического обеспечения системы копирующего управления манипуляторами АР, имеющей более высокую точность выполнения целевых операций, по сравнению с аналогами.

2.6 Выводы по разделу

В разделе проведена разработка методов для системы копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота.

Разработан метод оценки точности выполнения целевых операций манипулятором антропоморфного робота при копирующем управлении с экзоскелетного комплекса на основе сравнения степени выпрямления, радиус вектора центра ладони, углов Эйлера кисти и ориентации плоскости

проходящей через суставы руки оператора и манипулятора антропоморфного робота.

В разделе приведена разработка обобщенного алгоритма обработки информации для системы копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота, которая обусловлена необходимостью повышения точности выполнения целевых операций за счет внедрения в процесс копирующего управления научных решений, предложенных в исследовании:

- копирование движений оператора манипулятором антропоморфного робота осуществляется не по углам поворота, а по искусственным параметрам, введенным в методе оценки точности выполнения целевых операций;

- расчет искусственных параметров положения руки оператора будет производиться не на основе углов поворота в кинематических парах рычажной системы ЭК, а на основе значений углов поворота руки оператора, рассчитанных с помощью метода расчёта углов поворота руки оператора на основе углов поворота в кинематических парах рычажной системы ЭК.

Приведен алгоритм расчета обобщенных координат руки оператора на основе информации обобщенных координат экзоскелетного комплекса который состоит из 3 этапов: калибровки, решения прямой задачи кинематики представлением Денавита-Хартенберга и решения обратной задачи кинематики.

Нетривиальность решаемой в исследовании обратной задачи кинематики обуславливает необходимость разработки специального математического обеспечения на основе авторского метода расчета положения центра локтевого сустава руки оператора и выбора пространственного положения локтевого узла манипулятора. Метод использует геометрический подход к поиску значений углов поворота локтевого сустава руки оператора. Выбор искомой точки центра локтевого сустава руки оператора из 2-х возможных определяется встраиваемым условием, например, минимизация поворота звеньев исполнительного устройства, минимизация энергопотребления, выбор

минимального размаха, выбор кратчайшего расстояния. Вычислительная сложность порядка 10^4 операций делает возможным использование разработанного метода в системах копирующего управления.

3 ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЦЕЛЕВЫХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ КОПИРУЮЩЕМ УПРАВЛЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ

3.1 Калибровка экзоскелетного комплекса

Калибровка устройства для проведения экспериментальных исследований производится в следующей последовательности. Механизм костюма устанавливается на стенде калибровки фиксацией надплечевых элементов на пластиковых упорах. Стенд калибровки и установка ЭО показаны на рисунке 32.

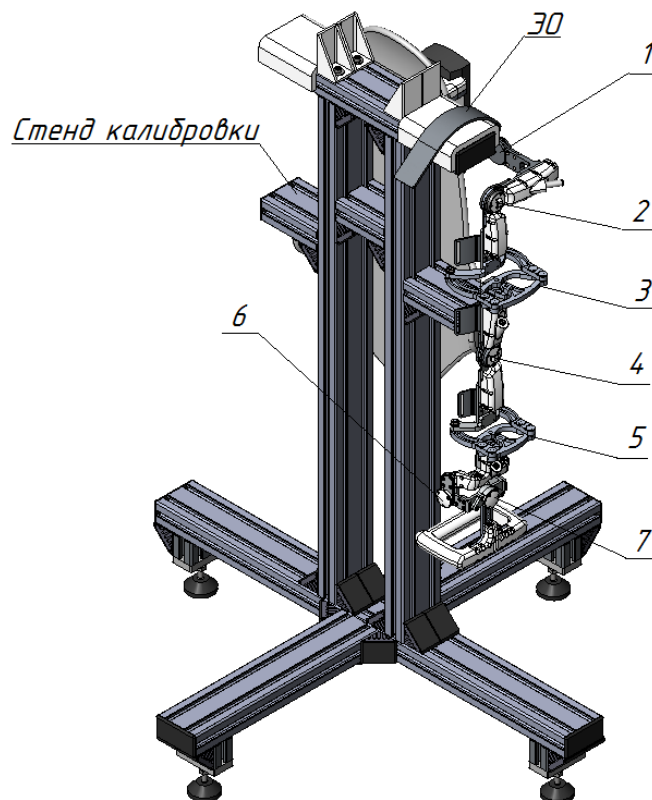


Рисунок 32 – Стенд калибровки

Гибкий защитный фиксатор туловища оператора должен быть расположен вдоль продольных балок стенда. Такая установка позволяет расположить весь механизм в вертикальном положении, что позволяет получить естественное положение звеньев, аналогичное расслабленной руке оператора в положении стоя. В экспериментальном образце имеется 7 основных регистрируемых степеней подвижности, представленные в таблице 6 [90, 92, 93]. Калибровку положений экзоскелета следует проводить последовательно, согласно порядковому номеру подвижности от 1 до 7.

Таблица 6 – Регистрируемые степени подвижности ЗУКТ

№ подвижности	Тип движения	Рабочая плоскость
1	Качание	XY
2	Качание	YZ
3	Ротация	Z
4	Качание	YZ
5	Ротация	Z
6	Качание	XY
7	Качание	YZ

Нулевое положение подвижности 1 обеспечивается путем механической фиксации шарнира, посредством винтового соединения. При фиксации этой подвижности положение датчиков регистрации автоматически принимают положение начала координат. Механическая фиксация необходима для обеспечения вертикального положения последующих звеньев механизма, что облегчает калибровки следующих подвижностей и не дают механизму «провиснуть» под действием собственного веса. Нулевое положение подвижности 2 обеспечивается автоматически, при условии фиксации подвижности 1, проверяется угломером.

Положения ротации 3 и 5 обеспечивается посредством совпадения маркировочных меток на подвижных частях механизма ротации. Проверяется обеспечением параллельности элементов конструкции посредством измерительной линейки.

Нулевое положение подвижности 2 обеспечивается автоматически, при условии фиксации подвижности 1, проверяется угломером.

Нулевое положение подвижности 4 обеспечивается автоматически, при условии фиксации подвижности 1, проверяется угломером.

Положения 6 и 7 обеспечиваются посредством совпадения маркировочных рисок, нанесённых на взаимоперемещающихся деталях конструкции и проверяются угломером.

Возможность приведения экзоскелета в описанное положение обеспечивает калибровку экзоскелета при углах 0, 90° (в зависимости от степени подвижности).

Объект экспериментальных исследований считается выдержавшим проверку, если стенд для калибровки обеспечивает возможность калибровки при углах 0, 90°.

3.2 Оценка точности повторения движений при копирующем управлении с экзоскелетного комплекса

Зависимости между углами поворота экзоскелета и углами поворота руки оператора имеют сложный аналитический, а в некоторых случаях алгоритмический характер. Дополнительно, конфигурационное пространство положения руки оператора имеет высокую размерность. Поэтому оценка точности выполнена с помощью метода Монте-Карло. Проведено большое количество экспериментов, а полученные результаты оценки точности отдельных экспериментов статистически обработаны.

Схема проведения единичного эксперимента приведена на рисунке 33. В рамках единичного эксперимента длины отделов руки оператора и углы поворота руки оператора генерируются стохастически. Допустимые значения углов поворота руки оператора лежат в диапазоне: $\theta_1 \in [-270^\circ; -90^\circ]$, $\theta_2 \in [0^\circ; 180^\circ]$, $\theta_3 \in [0^\circ; 180^\circ]$, $\theta_4 \in [0^\circ; 180^\circ]$, $\theta_5 \in [0^\circ; 180^\circ]$, $\theta_6 \in [0^\circ; 180^\circ]$, $\theta_7 \in$

$[-90^\circ; 90^\circ]$. Генерация углов поворота руки оператора осуществлялась с нормальным распределением, математическое ожидание которого совпадает с серединой диапазона допустимых значений, а утроенное значение среднеквадратичного отклонения равно половине диапазона допустимых значений.

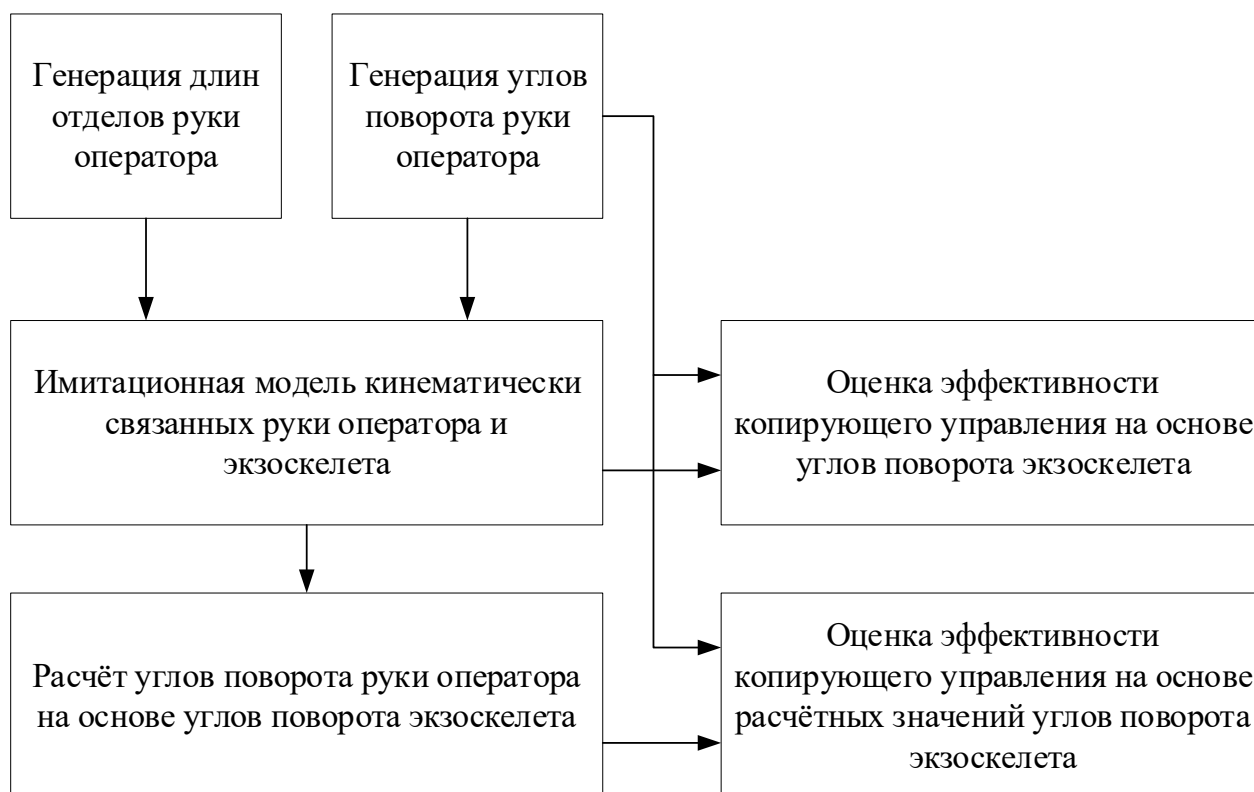


Рисунок 33 – Схема проведения единичного эксперимента

Имитационная модель кинематически связанных руки оператора и экзоскелета выполнена в среде MATLAB с применением пакета SimscapeMultibody. В процессе эксперимента с помощью имитационной модели на основе углов поворота руки оператора рассчитывались углы поворота экзоскелета.

Рассчитанные значения углов поворота экзоскелета использовались для оценки точности копирующего управления на основе углов поворота экзоскелета, как предложено в [72], т.е. без применения алгоритма расчёта углов поворота, предложенного в [75]. Также на основе углов поворота

экзоскелета вычислялись расчётные значения углов поворота руки оператора с помощью алгоритма, предложенной в [75].

Для оценки точности копирующего управления использовался метод, предложенный в разделе 2.1, где в качестве критериев копирующего управления АМ:

- рассогласование k_r степени выпрямления руки оператора и АМ;
- рассогласования k_φ , k_θ сферических координат радиус-вектора центра кисти оператора и радиус-вектора центра схвата АМ;
- рассогласование k_ψ углов поворота локтя оператора вокруг оси, проходящей через плечевой и лучезапястный сустав руки оператора и аналогичного угла поворота АМ;
- рассогласования k_α , k_β , k_γ углов Эйлера кисти оператора и кистевого звена АМ.

Точному управлению соответствует нулевое значение критериев k_r , k_φ , k_θ , k_ψ , k_α , k_β , k_γ .

Гистограммы распределения значений оценки точности копирующего управления, полученные в результате многократного повторения единичных экспериментов приведены на рисунках 34-40.

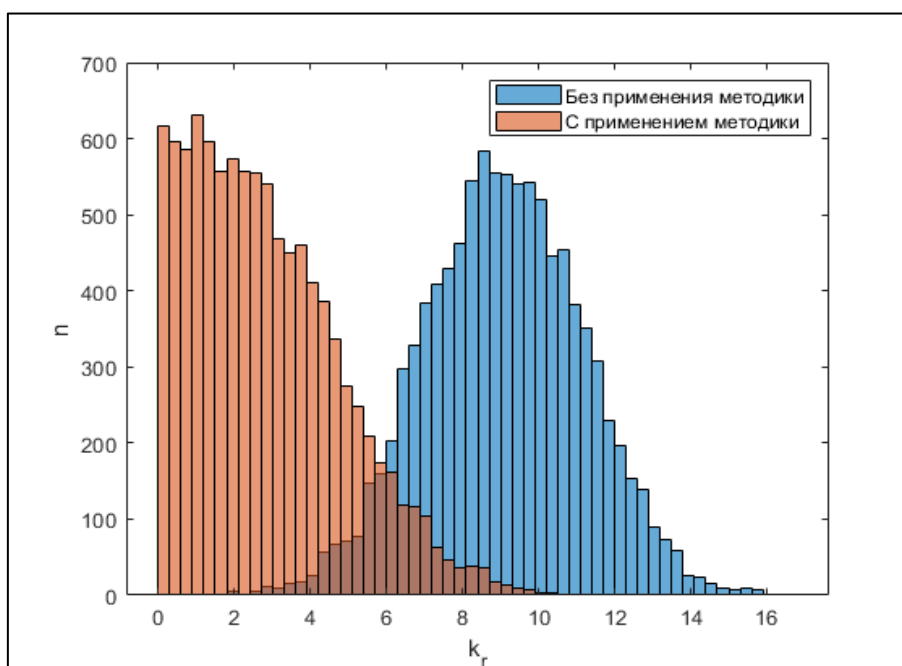
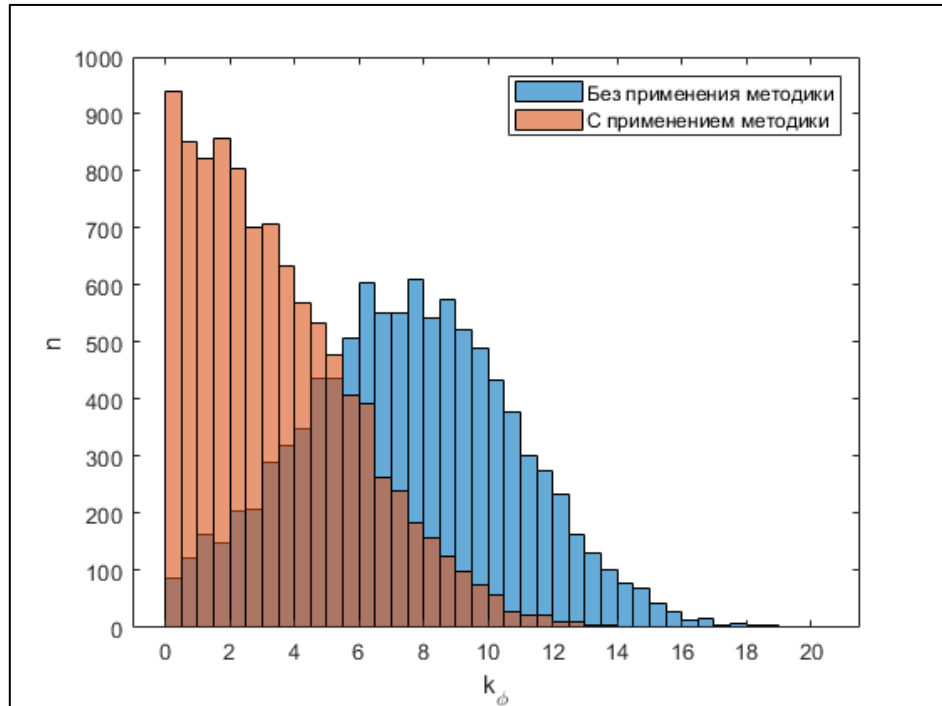
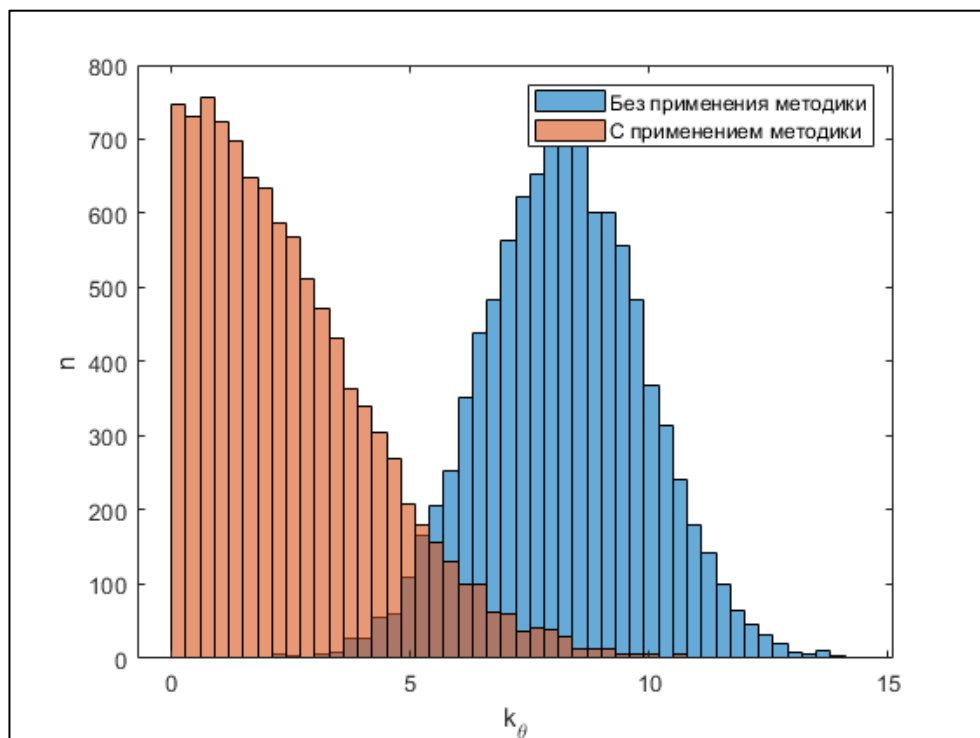


Рисунок 34 – Оценка копирующего управления по критерию k_r Рисунок 35 – Оценка копирующего управления по критерию k_φ Рисунок 36 – Оценка копирующего управления по критерию k_θ

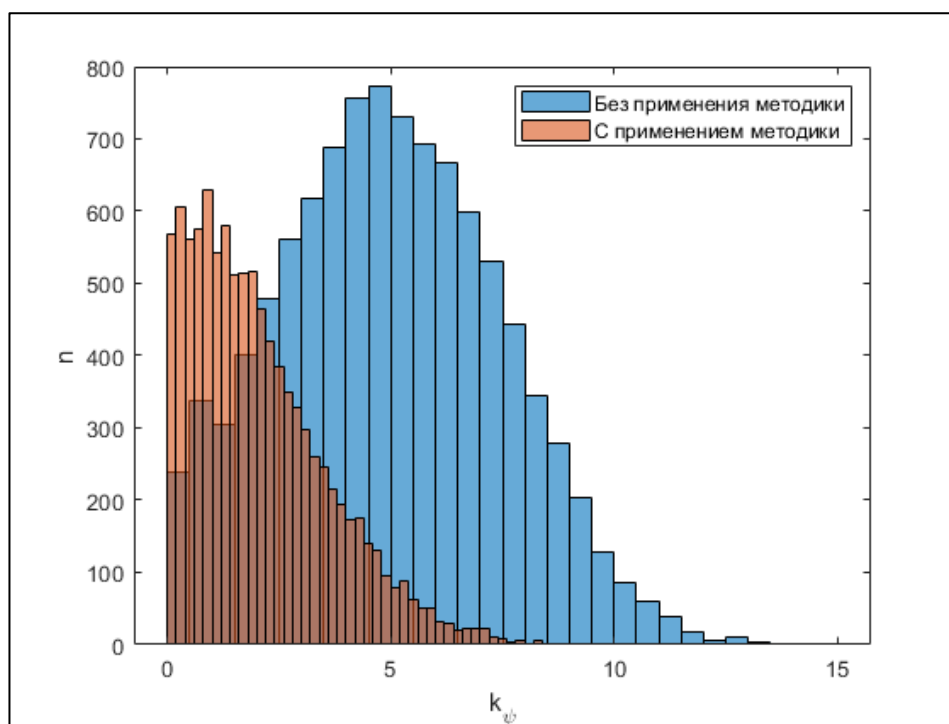


Рисунок 37 – Оценка копирующего управления по критерию k_ψ

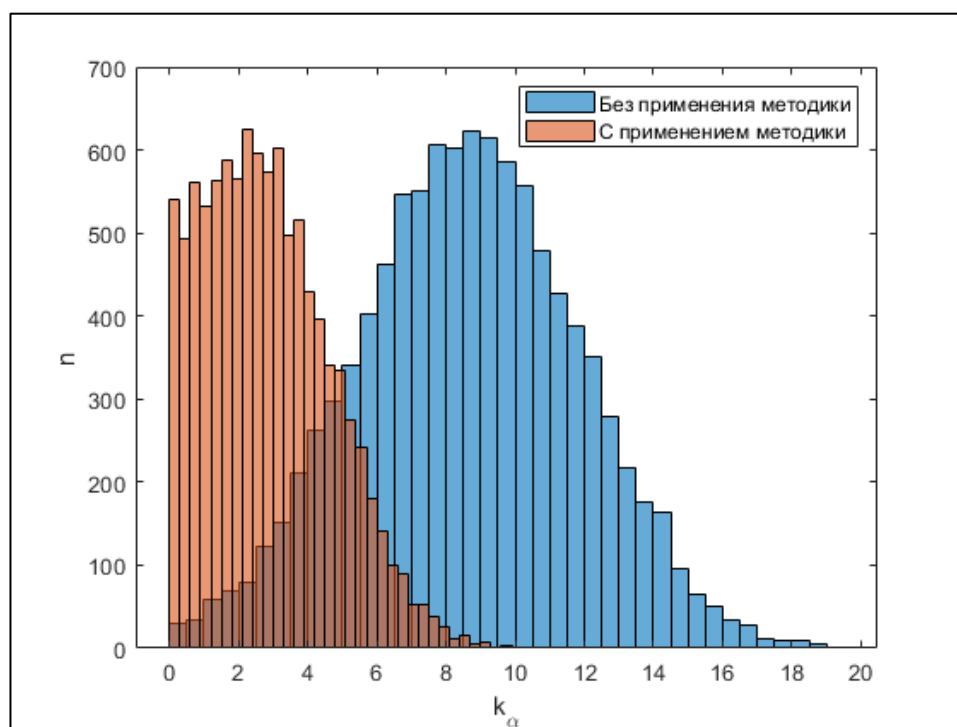


Рисунок 38 – Оценка копирующего управления по критерию k_α

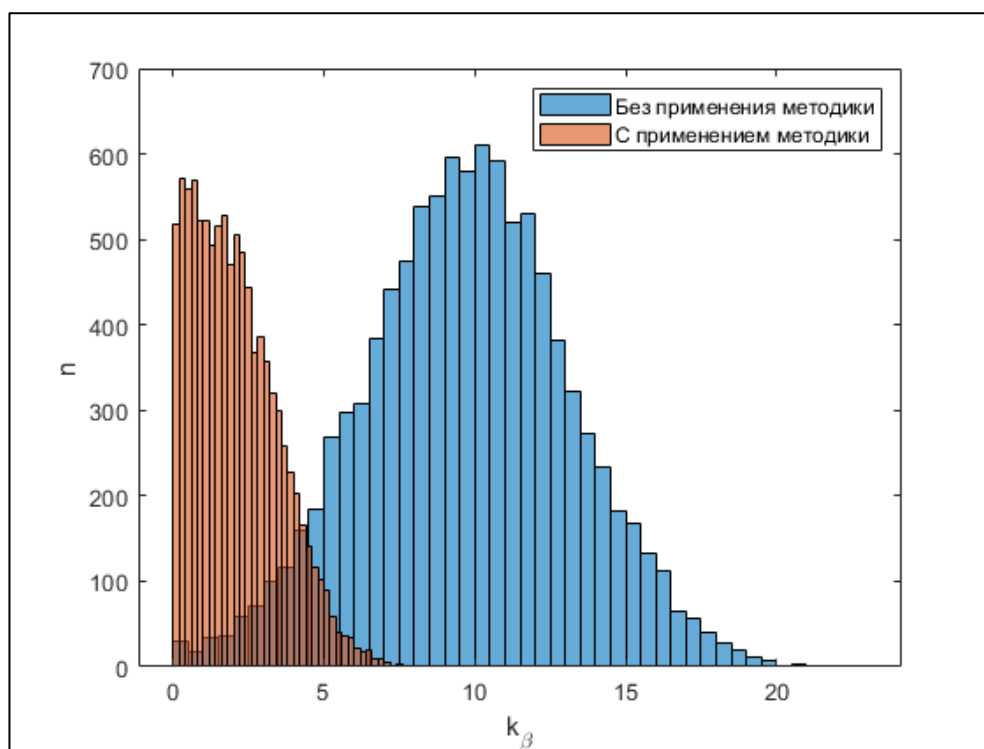


Рисунок 39 – Оценка копирующего управления по критерию k_β

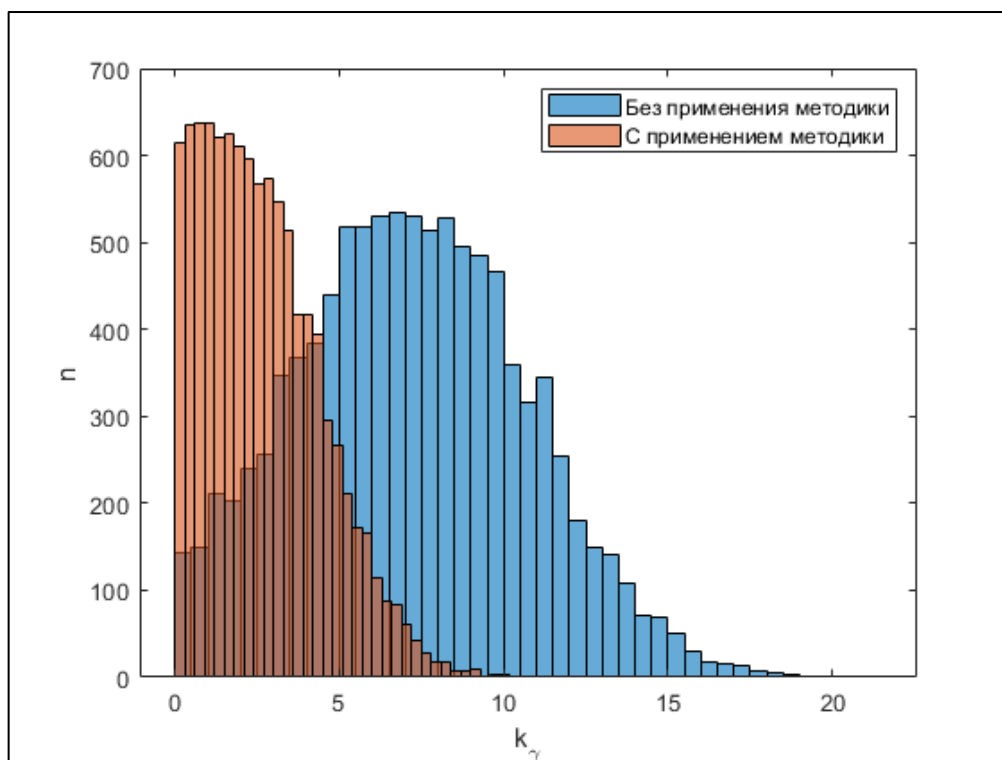


Рисунок 40 – Оценка копирующего управления по критерию k_γ

Как следует из рисунков 63-69, среднее улучшение значений критериев составило: $\Delta k_r = 6,26\%$; $\Delta k_\varphi = 4,04^\circ$; $\Delta k_\theta = 5,72^\circ$; $\Delta k_\psi = 2,9^\circ$; $\Delta k_\alpha = 5,71^\circ$;

$\Delta k_{\beta} = 7,57^{\circ}$; $\Delta k_{\gamma} = 4,58^{\circ}$. Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом:

- задействованное операционное пространства манипулятора увеличилось в среднем на 6,26%;
- ориентация радиус-вектора центра схвата манипулятора АР в пространстве стала ближе к целевой в среднем на 6,99°;
- поворот локтевого сочленения манипулятора АР вокруг радиус-вектора центра схвата манипулятора АР стал ближе к целевому на 2,93°;
- ориентация схвата манипулятора АР в пространстве стала ближе к целевой в среднем на 9,47°;
- угол поворота схвата манипулятора АР относительно продольной оси стал ближе к целевому в среднем на 4,58°.

Полученные результаты оценки точности копирующего управления антропоморфным манипулятором с применением обобщенного алгоритма расчёта углов поворота руки оператора на основе углов поворота экзоскелета свидетельствуют о его точности и актуальности применения в системах копирующего управления антропоморфным манипулятором с помощью задающего устройства в виде экзоскелета.

3.3 Оценка точности выполнения целевых операций манипуляторами при копирующем управлении с применением разработанного обобщенного алгоритма обработки информации

Для оценки точности разработанных методов и алгоритмов обработки информации при копирующем управлении манипуляторами АР проведена оценка точности выполнения целевых операций. Для оценки точности проведено два натуральных эксперимента. Первый эксперимент проведен без использования разработанного метода. Рука оператора вместе с ЭК неподвижно фиксируется в десяти реперных точках с помощью стенда «Мехатроника».

Реперные точки наиболее полно характеризуют движения оператора. В каждой реперной точке с помощью электронного угломера измерены углы поворота руки оператора. На основе углов поворота руки оператора вычислены необходимые положение и ориентация схвата манипулятора AP [95-100]. На основе фотосъёмки вычислены фактические положения и ориентация схвата манипулятора AP. Между фактическими и ожидаемыми значениями вычислена разность. Во втором эксперименте выполнены аналогичные действия, за исключением того, что при копирующем управлении использовались разработанные методы и алгоритмы. Результаты оценки точности представлены на рисунке 41.

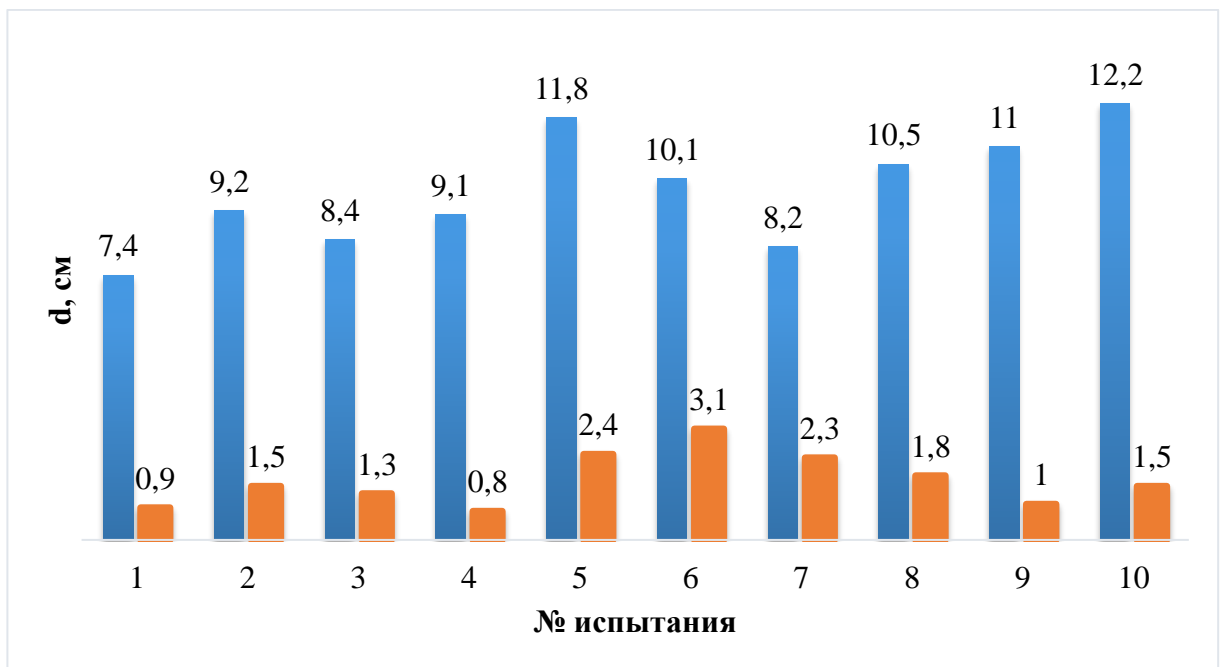


Рисунок 41 – Точность выполнения целевых операций предложенным обобщенным алгоритмом и методом аналогом, точность положения схвата манипулятора AP в пространстве

Таким образом, разработанные методы и алгоритмы обработки информации с экзоскелетного комплекса при копирующем управлении манипуляторами антропоморфного робота позволяют улучшить точность

выполнения целевых операций на 83,4%, с 9,8 см до 1,6 см (уменьшение на 8,2 см).

3.4 Выводы по разделу

Оценка точности повторения движений манипулятором АР при копирующем управлении с ЭК показала следующий результат: операционное пространство увеличилось на 6,26%; ориентация радиус-вектора центра схвата манипулятора АР в пространстве стала ближе к целевой на 6,99°; поворот локтевого сочленения манипулятора АР вокруг радиус-вектора центра схвата манипулятора АР стал ближе к целевому на 2,93°; ориентация схвата манипулятора АР в пространстве стала ближе к целевой на 9,47°; угол поворота схвата манипулятора АР относительно продольной оси стал ближе к целевому в среднем на 4,58°.

Разработанные методы и алгоритмы обработки информации с ЭК при копирующем управлении манипуляторами АР позволяют улучшить точность выполнения целевых операций на 8,2 см (с 9,8 см до 1,6 см). Точность метода аналога составляет 17% от длины манипулятора (56,8 см) и компенсируется проприоцепцией, в то время как точность предлагаемых методов составляет 3%. Общее улучшение точности равно 14%.

4 РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ К ПРИМЕНЕНИЮ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

4.1 Структурасистемы копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота

Для реализации предложенных методов и алгоритмов в работе предлагаются рекомендации по внедрению результатов в структуру системы управления манипуляторами.

Система копирующего управления манипуляторами АР включает следующие аппаратные части:

- экзоскелетный комплекс;
- ЭВМ;
- устройство управления манипуляторами АР.

В качестве ЭВМ для технической реализации системы копирующего управления манипуляторами АР может использоваться ПК оператора, а в качестве устройства управления манипуляторами АР – совокупность блока программного контроллера и блока управления приводами манипуляторами АР.

В совокупности данные аппаратные составляющие образуют экспериментальный образец системы обработки и передачи сигналов управления.

Система копирующего управления манипуляторами АР включает следующие программные компоненты:

- основная программа;

- модуль формирования законов управления приводами манипуляторов АР;

- модуль передачи сигналов управления манипуляторами АР.

Система копирующего управления манипуляторами АР включает:

- персональный компьютер оператора (верхний уровень), предназначенный для синхронизации работы приводов, визуализации процесса выполнения технологических операций и записи информации в базе данных;

- блок программного контроллера (средний уровень), предназначенный для преобразования управляющих команд, поступающих от ПК, в сигналы, передаваемые на блок управления приводами;

- блок управления приводами (нижний уровень), предназначенный для управления исполнительным механизмом.

Система копирующего управления манипуляторами АР с использованием экзоскелетного комплекса состоит из 2-х частей и включает в себя модуль регистрации углов поворота руки оператора и модуль решения обратной задачи динамики (рис. 42).

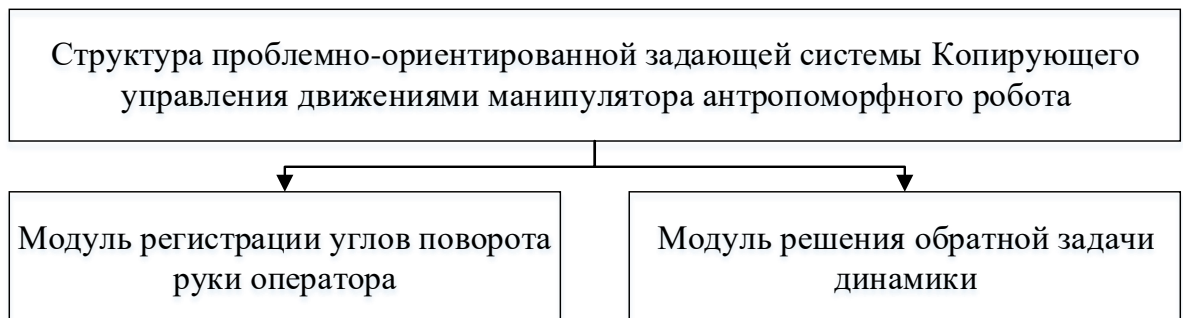


Рисунок 42 – Структура системы копирующего управления манипуляторами АР с использованием экзоскелетного комплекса

В данной работе рассматривается модуль регистрации углов поворота руки оператора.

Входными данными для модуля регистрации углов поворота руки оператора являются:

- координаты точки $\mathbf{B}_1 = (0; 0; 0)$, принятой за начало отсчёта;
- координаты вектора жесткой сцепки $\mathbf{B}_1\mathbf{C}_1 = (x_{B_1C_1}; y_{B_1C_1}; z_{B_1C_1})$;
- длины частей руки оператора $l_{B_1-B_2}, l_{B_2-B_3}, l_{B_3-B_4}$;
- длины звеньев задающего устройства $l_{C_1-C_2}, l_{C_2-C_3}, l_{C_3-C_4}$;
- длины сцепок B_2C_2, B_3C_3 и $B_4C_4 - l_{B_2-C_2}, l_{B_3-C_3}, l_{B_4-C_4}$.
- вектор измеренных значений обобщённых координат ЭК:
 $\theta' = (\theta'_1, \theta'_2, \theta'_3, \theta'_4, \theta'_5, \theta'_6, \theta'_7)^T$.

В рамках технической реализации необходимо рассмотреть организацию ввода и хранения входных данных.

Введем определение сеанса работы. Под сеансом работы будем понимать временной промежуток, в течение которого параметры $\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_1\mathbf{C}_1, l_{B_1-B_2}, l_{B_2-B_3}, l_{B_3-B_4}, l_{C_1-C_2}, l_{C_2-C_3}, l_{C_3-C_4}, l_{B_2-C_2}, l_{B_3-C_3}, l_{B_4-C_4}$, характерные для определенного оператора, остаются постоянными. Данные параметры необходимо вводить перед каждым сеансом работы. Ввод параметров может каждый раз выполняться вручную, однако более рациональным способом является их единовременный ввод и сохранение в виде готового набора, который может быть впоследствии выбран. Ввод параметров оператора или их выбор из сохраненных наборов удобнее всего выполнять с помощью программы для ЭВМ с графическим интерфейсом [25, 26, 101-104].

Вектор измеренных значений обобщённых координат ЭК θ' формируется системой регистрации углов относительного поворота звеньев рычажной системы ЭК.

Для осуществления вычислений в модуле регистрации углов поворота руки оператора требуется вычислительная система, в роли которой может выступать ЭВМ, необходимая для ввода параметров оператора или выбора одного из сохраненных наборов значений.

Выходными данными модуля регистрации углов поворота руки оператора являются углы поворота руки оператора θ . Т.к. расчет углов поворота руки оператора выполняется на ЭВМ, они могут быть преобразованы и переданы в любом необходимом формате. Использование выходных данных модуля

регистрации углов поворота руки оператора зависит от назначения конкретной системы.

Исходя из приведенного описания и обоснования, структура аппаратной составляющей технической реализации модуля регистрации углов поворота руки оператора имеет вид, представленный на рисунке 43.

Программная составляющая технической реализации модуля регистрации углов поворота руки оператора представлена на рисунке 44.

Программная составляющая технической реализации модуля регистрации углов поворота руки оператора должна включать в себя следующие абстрактные программные компоненты:

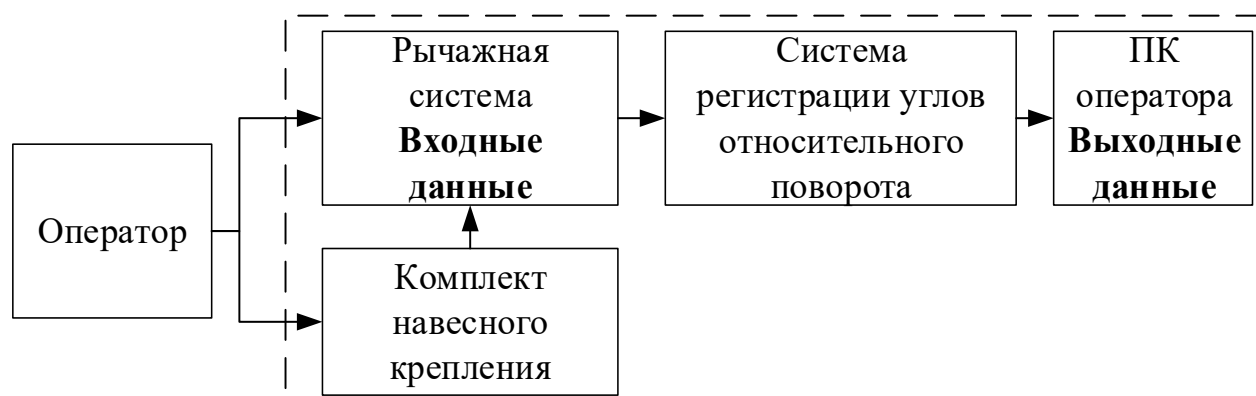


Рисунок 43 – Структура аппаратной составляющей технической реализации модуля регистрации углов поворота руки оператора

Основная программа, осуществляющая общую координацию работы модуля сбора данных и модуля регистрации углов поворота руки оператора. Данная программа также имеет графический интерфейс для ввода пользователем входных данных или выбора одного из сохраненных наборов.

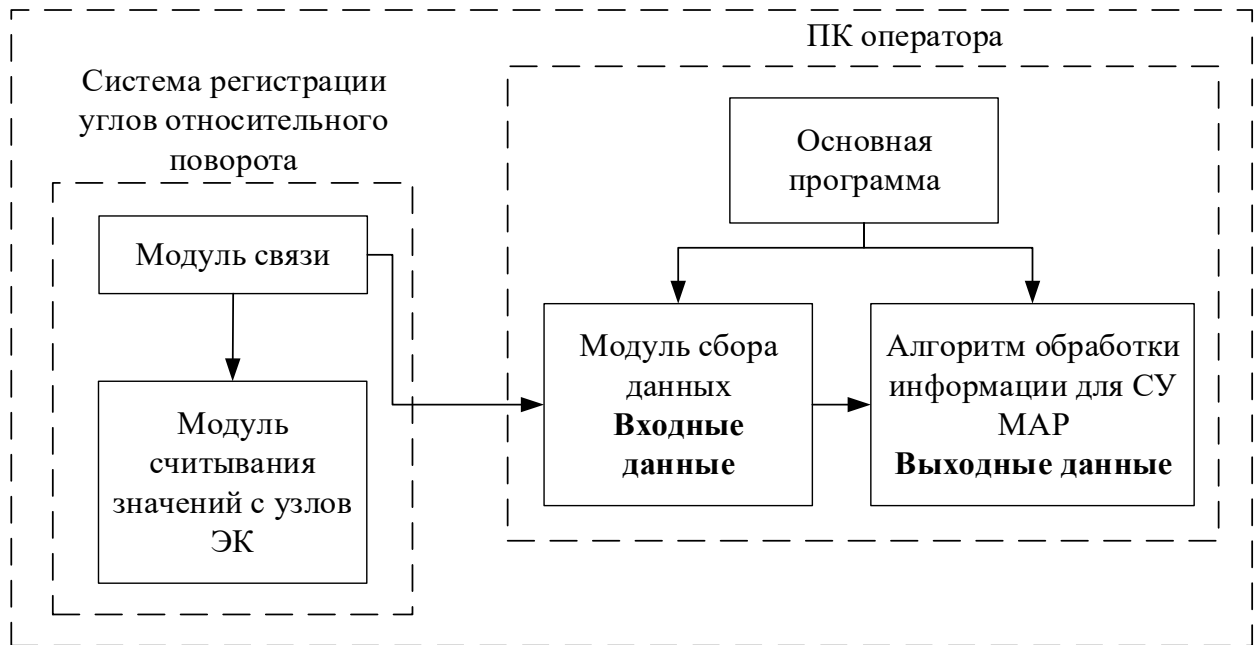


Рисунок 44 – Структура программной составляющей модуля регистрации углов поворота руки оператора

Рассмотрим основные модули, которые являются входными данными для предлагаемых методов и алгоритмов, а также систему связи робота для полноценной реализации системы ЭК.

4.1.1 Модуль считывания значений с узлов экзоскелета

Программа предназначена для считывания значений датчиков угла поворота, установленных в узлах экзоскелета. Общий алгоритм программы приведен на рисунке 45.

Выходными данными является набор измеренных значений углов поворота экзоскелета, которые передаются на ПО верхнего уровня с использованием Модуля связи.

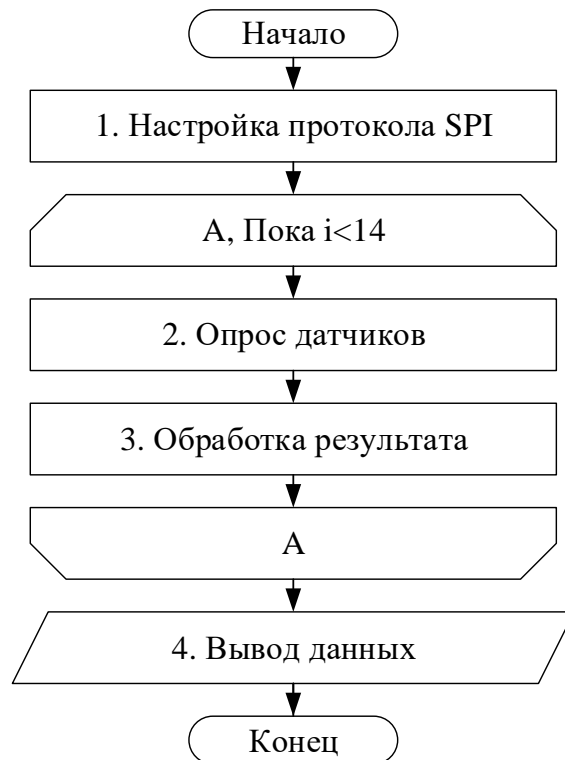


Рисунок 45 – Общий алгоритм программы считывания значений с узлов экзоскелета

Алгоритм программы состоит из 4 этапов:

Этап 1. На первом этапе выполняется инициализация параметров для подключения периферийных устройств по протоколу SPI.

Этапы 2-3. На втором и третьем этапах в цикле выполняется опрос датчиков углового положения с последующим преобразованием в строковый формат.

Этап 4. На четвертом этапе выполняется вывод данных.

Программа написана на языке C, текст оформлен в виде двух методов.

Программа содержит следующие методы:

- SpiIni для инициализации параметров для подключения периферийных устройств по протоколу SPI;
- GetData для последовательного считывания значений датчиков.

Основной функцией программы является считывание значений датчиков угла поворота, установленных в узлах экзоскелета, по протоколу SPI.

Входными данными являются значения датчиков углового положения, поступающие по протоколу SPI при запросе программы.

4.1.2 Модуль связи

Программа предназначена для передачи набора измеренных значений углов поворота звеньев ЭК, поступающих от модуля считывания значений с узлов экзоскелета.

Общий алгоритм программы приведен на рисунке 46.



Рисунок 46 – Общий алгоритм программы модуля связи

Алгоритм программы состоит из 3 этапов:

Этап 1. На первом этапе выполняется ввод исходных данных: номер порта для создания подключения по протоколу UDP и пакеты данных, содержащие набор зарегистрированных значений углов поворота звеньев ЭК, поступающие от Модуля считывания значений с узлов экзоскелета. Этап 2. На втором этапе выполняется создание и конфигурация UDP сокета. Этап 3. На третьем этапе выполняется передача данных.

Программа написана на языке C, текст оформлен в виде двух методов. Программа содержит следующие методы:

– `UDPTransportInit` для инициализации UDP сокета и создания подключения;

– UDPSend для передачи данных по протоколу UDP.

Основным назначением программы является передача данных на ПО верхнего уровня.

Основной функцией программы является передача данных от Модуля считывания значений с узлов экзоскелета.

Для выполнения данной функции необходимы следующие входные данные: номер порта процесса-получателя и измеренные значения углов поворота звеньев экзоскелета, поступающие от Модуля считывания значений с узлов экзоскелета.

Выходными данными являются пакеты данных, содержащие измеренные значения с узлов экзоскелета.

4.1.3 Модуль сбора данных

Программа предназначена для приема набора измеренных значений углов поворота звеньев ЭК, поступающих от модуля связи. Программа представляет собой класс Receiver. Методы данного класса предназначены для приема пакетов данных и формирования набора значений углов поворота звеньев экзоскелета.

Общий алгоритм программы приведен на рисунке 47.

Алгоритм программы состоит из 4 этапов:

Этап 1. На первом этапе выполняется ввод исходных данных: номер порта для создания подключения по протоколу UDP и пакеты данных, содержащие набор зарегистрированных значений углов поворота звеньев ЭК, поступающие от модуля связи.

Этап 2. На втором этапе выполняется создание и конфигурация UDP сокета, открывается порт.

Этап 3. На третьем этапе выполняется прослушивание порта, прием пакетов данных.

Этап 4. На четвертом этапе выполняется вывод принятых данных.

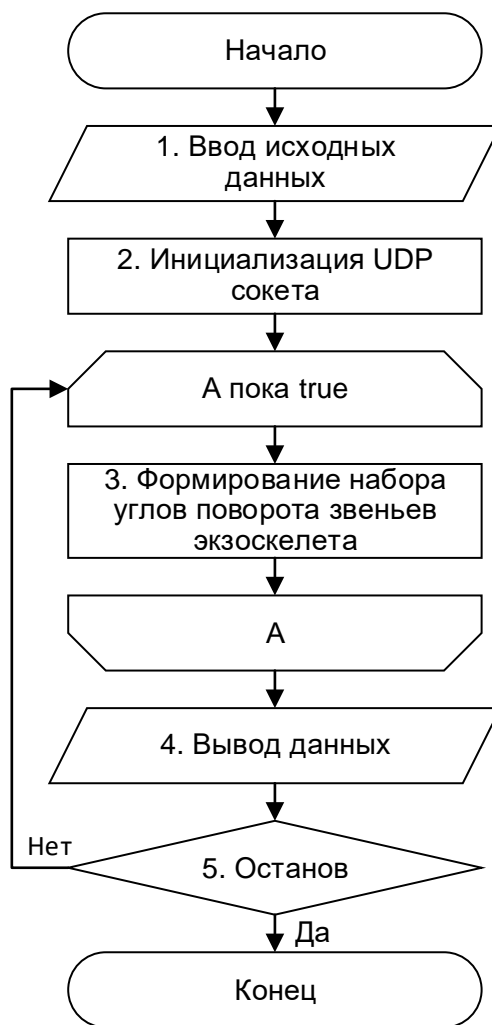


Рисунок 47 – Общий алгоритм программы модуля сбора данных

Этап 5. На пятом этапе выполняется проверка критерия останова, которыми являются завершение работы программы или ошибка передачи данных.

Входными данными является номер порта процесса-отправителя, устанавливаемый оператором при запуске Основной программы программного комплекса ЭК, а также пакеты данных, содержащие набор зарегистрированных значений углов поворота звеньев ЭК, поступающие от модуля связи.

Выходными данными является набор измеренных углов звеньев экзоскелета с меткой времени.

4.1.4 Модуль расчета углов поворота руки оператора

Модуль расчета углов поворота руки оператора, являющийся программной реализацией алгоритма обработки информации с ЭК, а для определения взаимоположения суставов руки оператора.

Программа решает следующие классы задач: определение взаимоположения суставов руки оператора и сочленений ЭК; преобразование декартовых координат суставов руки оператора в обобщенные координаты; расчет углов поворота руки оператора на основе обобщенных координат ЭК в масштабе реального времени.

Программа предназначена для расчета углов поворота руки оператора на основе обобщенных координат ЭК в масштабе реального времени. Общий алгоритм программы приведен на рисунке 48.

Алгоритм программы состоит из 4 этапов.



Рисунок 48 – Общий алгоритм программы модуля регистрации углов поворота руки оператора

Этап 1. На первом этапе осуществляется ввод конструктивных данных:

- координаты точки $B_1 = (0; 0; 0)$, принятой за начало отсчёта;

- координаты вектора жесткой сцепки $B_1C_1 = (x_{B_1C_1}; y_{B_1C_1}; z_{B_1C_1})$;
- длины частей руки оператора $l_{B_1-B_2}, l_{B_2-B_3}, l_{B_3-B_4}$;
- длины звеньев ЭК $l_{C_1-C_2}, l_{C_2-C_3}, l_{C_3-C_4}$;
- длины сцепок B_2C_2, B_3C_3 и $B_4C_4 - l_{B_2-C_2}, l_{B_3-C_3}, l_{B_4-C_4}$;
- вектор измеренных значений обобщенных координат ЭК:
 $\theta' = (\theta'_1, \theta'_2, \theta'_3, \theta'_4, \theta'_5, \theta'_6, \theta'_7)^T$.

Этап 2. Второй этап выполнения алгоритма представляет собой predetermined procedure определения пространственного положения суставов руки оператора. Алгоритм процедуры, представленный на рисунке 49, состоит из 6 шагов.

Шаг 1. Ввод измеренных значений углов поворота звеньев экзоскелета, снимаемых с энкодеров.

Шаг 2. Расчет координат суставов руки оператора с жесткой сцепкой B_1, B_3 на основе решения прямой задачи кинематики.

Шаг 3. Расчет вариантов пространственного положения локтевого сустава руки оператора B_{2a} и B_{2b} .

Шаг 3. Третий шаг процедуры содержит вложенную подпроцедуру выбора варианта пространственного положения локтевого сустава руки оператора. Подпроцедура реализует алгоритм, который представлен на рисунке 50.

Шаг 5. Расчет координат локтевого сустава руки оператора B_2 .

Шаг 6. Расчет вектора нормали N к плоскости ладони руки оператора.

Этап 4. На четвертом этапе выполняется расчет углов поворота суставов руки оператора.

Этап 4.1. На четвертом этапе выполняется вывод рассчитанных значений углов поворота руки оператора $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7$.

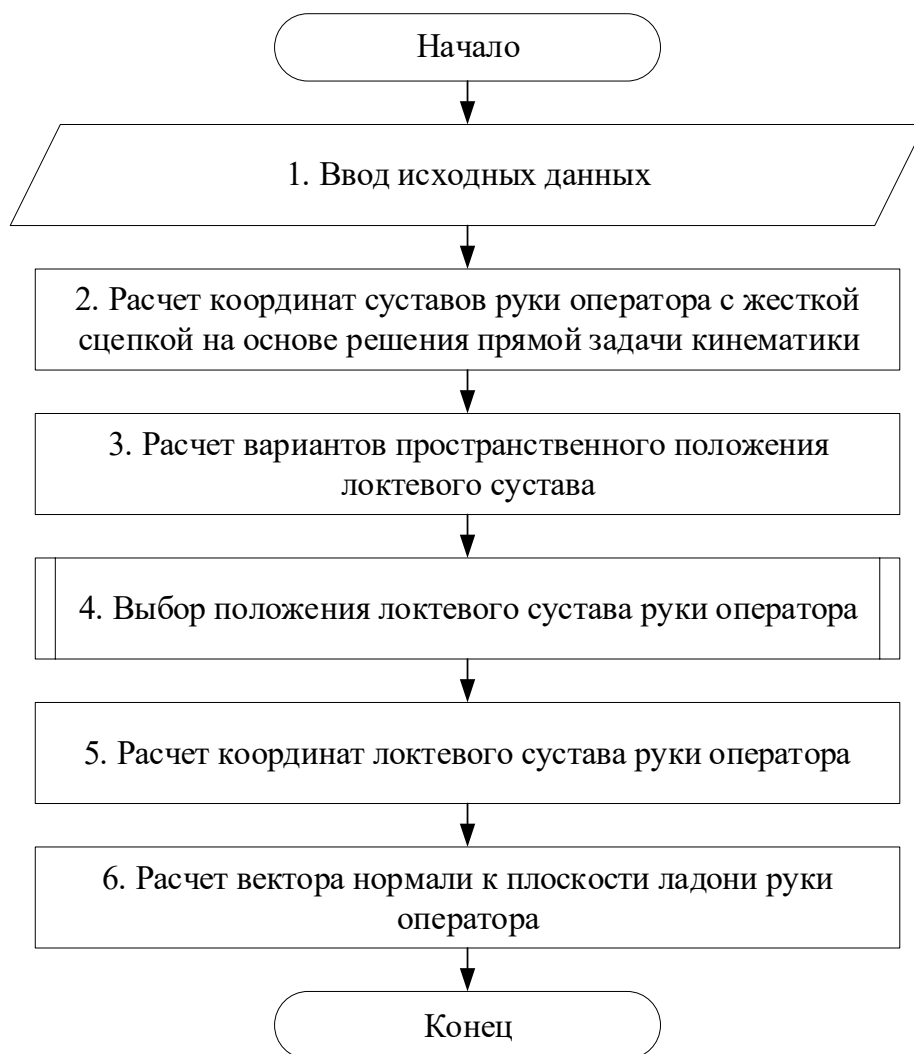


Рисунок 49 – Алгоритм процедуры определения пространственного положения суставов руки оператора

В рамках разработанной программы применяется ряд математических методов, среди которых:

- метод решения прямой задачи кинематики;
- метод решения обратной задачи кинематики.

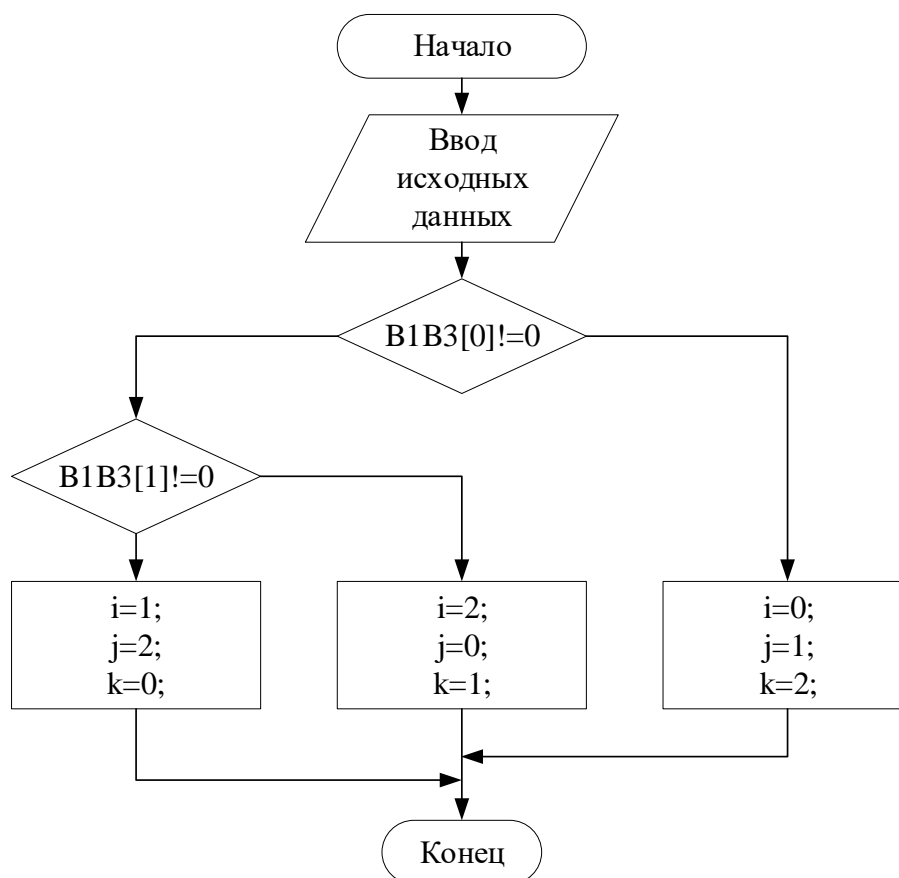


Рисунок 50 – Алгоритм подпроцедуры выбора варианта пространственного положения локтевого сустава руки оператора

Программа написана на языке C#, текст оформлен в виде следующих классов: AngleCalculator, GeometryUtil, Matrix, TransformationMatrix, Vector, HomogeneousVector, DH.

Основным классом является AngleCalculator, который содержит методы:

- SetExAngle для установки значений измеренных обобщенных координат ЭК;
- GetAngles для расчета углов поворота руки оператора на основе обобщенных координат ЭК;
- GetDecart для расчета декартовых координат суставов руки оператора, реализующий метод решения прямой задачи кинематики;

– `InverseKinematic` для расчета углов поворота руки оператора на основе декартовых координат суставов руки оператора, реализующий метод решения обратной задачи кинематики.

Остальные классы являются вспомогательными и предназначены для осуществления математических операций над матрицами и векторами, используемыми в методах класса `AngleCalculator`.

Программа представляет собой библиотеку классов, основным из которых является класс `AngleCalculator`. Методы данного класса предназначены для передачи классу `AngleCalculator` исходных данных для расчета, а также расчета углов поворота руки оператора на основе обобщенных координат ЭК.

Библиотека классов включает вспомогательные классы `GeometryUtil`, `Matrix`, `TransformationMatrix`, `Vector`, `HomogeneousVector` и `DH`. Данные классы предназначены для обеспечения геометрических преобразования и математических расчетов, используемых в методах класса `AngleCalculator`.

Класс `GeometryUtil` предназначен для осуществления вспомогательных геометрических преобразований (преобразование из радианов в градусы и наоборот).

Класс `Matrix` предназначен для отображения объектов матриц и содержит все необходимые операции над матрицами.

Класс `TransformationMatrix` является наследуемым от класса `Matrix` и служит для отображения матриц однородных преобразований.

Класс `Vector` предназначен для отображения математических векторов.

Класс `HomogeneousVector` является наследуемым классом от `Vector` и предназначен для отображения однородных векторов.

Класс `DH` предназначен для моделирования и осуществления действий с представлением Денавита-Хартенберга.

Входными данными являются:

- координаты вектора жесткой сцепки плечевого узла; длины частей руки оператора;
- длины звеньев ЭК;

- длины сцепок частей руки оператора и звеньев ЭК
- вектор измеренных значений обобщённых координат ЭК;

Выходными данными является массив углов поворота руки оператора, который под управлением Основной программы программного комплекса ЭК передается в Модуль записи данных.

4.1.5 Модуль передачи сигналов управления антропоморфным манипулятором

Модуль передачи сигналов управления манипуляторами АР, осуществляющий передачу сформированных модулем формирования законов управления приводами манипуляторов АР, законов управления приводами манипуляторов АР управляющей программе АМ.

Общий алгоритм программы приведен на рисунке 51.



Рисунок 51 – Общий алгоритм программы

Алгоритм программы состоит из 4 этапов:

Этап 1. На первом этапе выполняется ввод исходных данных: IP-адрес и порт получателя, набор сигналов управления АМ.

Этап 2. На втором этапе выполняется создание и конфигурация UDP сокета, открывается порт.

Этап 3. На третьем этапе выполняется подготовка и передача пакетов данных.

Этап 4. На четвертом этапе в зависимости от результата выполнения отправки пакетов данных выводится подтверждение успешной отправки сообщение об ошибке.

Основным назначением программы является передача данных в систему управления манипуляторами АР.

Создание объекта класса программы и ввод исходных данных выполняется основной программой программного комплекса ЭК.

Для выполнения данной функции необходимы следующие входные данные: IP-адрес и номер порта получателя, устанавливаемые оператором при запуске основной программы, а также пакеты данных, содержащие набор сигналов управления манипуляторами АР, поступающие от Модуля расчета углов поворота руки оператора на основе обобщенных координат ЭК. Выходными данными является сообщение об успешности отправки пакетов данных в систему управления манипуляторами АР.

4.2 Имитационная программа для моделирования взаимодействия манипулятора антропоморфного робота с объектами внешней среды

Несмотря на интуитивность копирующего способа управления, управление с его помощью манипулятора АР требует от оператора некоторой сноровки. Поэтому перед выполнением ответственных операций неподготовленным операторам требуется прохождение обучения. Наибольшую трудность вызывает взаимодействие манипулятора АР с объектами внешней

среды. Обучение оператора взаимодействию манипулятора АР с объектами внешней среды может выполняться в процессе управления реальным антропоморфным манипулятором, однако такой подход может привести к повреждению или поломке манипулятора АР. Поэтому желательно предварительное обучение оператора на имитационной программе, что обосновывает необходимость её разработки.

Имитационная 3D-модель взаимодействия манипулятора АР с объектами внешней среды решает следующие классы задач:

- создание моделей роботизированных систем и виртуального окружения;
- симуляция физического взаимодействия между элементами модели и окружающими объектами.

Имитационная 3D-модель взаимодействия антропоморфного манипулятора с объектами внешней среды предназначена для формирования информационного обеспечения при работе оператора в условиях, имитирующих реальные [105-108]. Общий алгоритм программы представлен на рисунке 52.

Алгоритм состоит из следующих этапов:

1. Загрузка параметров роботизированной системы: количество, размеры и позиции сочленений, типы соединений, степени свободы каждого из соединений.

2. Проверка текущего режима работы программы: режим проектирования, режим имитации.

3. Режим проектирования служит для изменения уже имеющейся модели роботизированной системы: добавление и удаление элементов, изменение типа соединений звеньев, ограничений поворотов суставов, добавление и удаление объектов окружения.

3.1. Ввод конструктивных данных: длины звеньев, типы соединений, параметры ограничений, физические параметры объектов окружения (размер, положение, ориентация в пространстве, вес).

3.2.Обработка введенных данных и внедрение их в имеющуюся модель роботизированной системы и окружение.

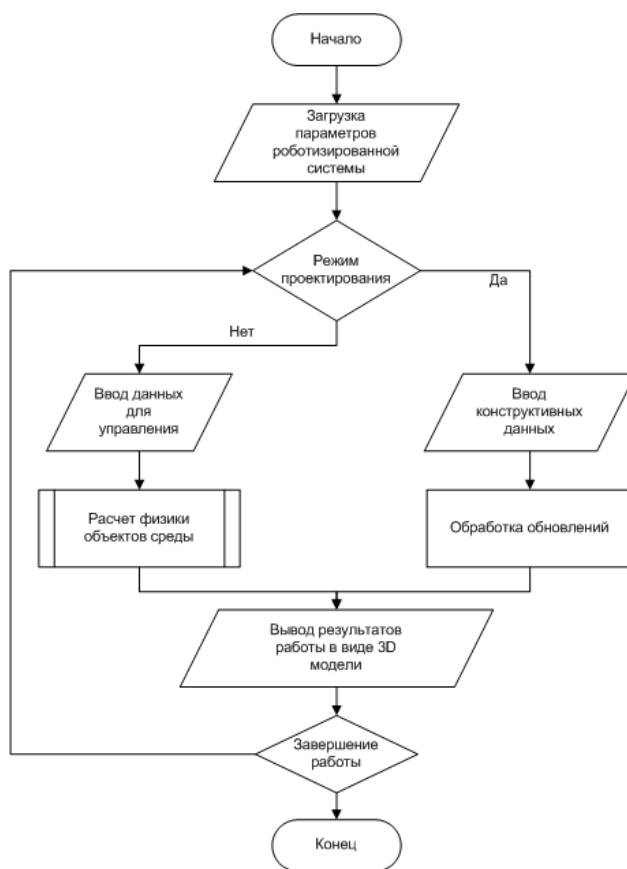


Рисунок 52 – Общий алгоритм работы имитационной 3D модели

4. Режим имитации служит для расчета физических процессов и взаимодействия предметов окружающей среды и модели роботизированной системы.

4.1.Ввод данных для управления может осуществляться одним из двух источников: программа расчета углов поворота руки оператора, приемник информации о повороте суставов манипулятора через удаленно по протоколу TCP/IP.

4.2.Расчет физики объектов среды: расчет взаимодействия предметов окружающей среды и модели роботизированной системы с учетом физических законов реального мира.

5. Вывод полученных данных на экран ЭВМ в виде 3D модели роботизированной системы.

Программный модуль написан на языке C#, текст оформлен в виде четырнадцати файлов: Program.cs, MainWindow.cs, NewProject.cs, FilePanel.cs, Emulator.cs, IKControl.cs, IPControl.cs, Pallette.cs, PhysicsObjects.cs, PhysicsSimulator.cs, SkeletonTree.cs, Skeleton.cs, CoreEnums.cs, Project.cs (табл. 7).

Таблица 7 – Назначение файлов программного модуля

Файл	Назначение
Program.cs	Содержит головную функцию main () с инструкциями для запуска всех элементов программного модуля
MainWindow.cs	Реализует форму главного окна программы
NewProject.cs	Реализует форму для управления созданием новой модели роботизированной системы
CoreEnums.cs	Содержит базовые параметры программного модуля.
Project.cs	Реализует класс для архивации и разархивации файлов имитационной модели.
FilePanel.cs	Реализует форму со списком задействованных файлов для формирования модели антропоморфного манипулятора
Emulator.cs	Реализует форму визуализации 3D модели антропоморфного манипулятора и объектов окружающей среды
IKControl.cs	Реализует форму для управления процедурой расчета углов поворотов сочленений роботизированной системы путем решения обратной задачи кинематики
IPControl.cs	Реализует класс сервера для приема данных состояния поворота сочленений роботизированной системы
Pallette.cs	Реализует форму выбора цвета объекта окружающей среды
PhysicsObjects.cs	Реализует форму управления объектами окружающей среды
PhysicsSimulator.cs	Реализует форму управления программой расчета физических взаимодействий между антропоморфным манипулятором и объектами внешней среды
SkeletonTree.cs	Реализует форму управления редактированием модели роботизированной системы
Skeleton.cs	Реализует классы элементарных частей роботизированной системы (скелет, кость)

Программный модуль реализован в виде основной программы I3DM.exe,

программы расчета физических взаимодействий объектов BulletSharp.dll, программы визуализации имитационной 3D модели SharpDX.dll, написанных на языке C#. Общий порядок работы таков:

1. Открытие файла имитационной модели антропоморфного манипулятора.
2. Открытие окна редактирования скелета антропоморфного манипулятора
3. Активация процедуры расчета физических взаимодействий объектов
4. Выбор источника управления (канал связи по протоколу TCP/IP или поиск углов решением обратной задачи кинематики).
5. В случае выбора в качестве источника канал связи по протоколу TCP/IP запускается сервер в ожидании подключений и приема данных поворотов углов сочленений.
6. При поиске углов решением обратной задачи кинематики оператор вводит координаты цели, которую должен достигнуть антропоморфный манипулятор.
7. Получение текущего состояния объектов путем расчета физического взаимодействия объектов.
8. Вывод имитационной 3D модели на экран ЭВМ.
9. Операции 10-13 повторяются до завершения работы программы оператором.
10. Переключение в режим проектирования происходит автоматически, таким образом, оператор может изменять структуру модели антропоморфного манипулятора в реальном времени.

Непосредственное взаимодействие пользователя с программным модулем происходит посредством файла I3DM.exe. Кроме ввода данных, вся работа программного модуля производится полностью автоматически.

Т.к. программа является программным компонентом, осуществляющим только визуализацию взаимодействия антропоморфного манипулятора с объектами внешней среды, для его работы не требуются устройства связи или

иное специфического оборудования. Требования к реализации системы управления приведены в таблице 8.

Имитационная модель управляется посредством графического пользовательского интерфейса с помощью манипулятора «мышь».

Выходной информацией является имитационная 3D модель манипулятора AP на экране ЭВМ оператора.

Таблица 8 – Минимальные и рекомендуемые системные требования

	Параметр	Минимальное значение	Рекомендуемое значение
1	Объем оперативной памяти	1 Гб	4 Гб
2	Объем жесткого диска	120 Гб	500 Гб
3	Частота процессора	1.5 ГГц	3 ГГц
4	Количество ядер ЦП	2	4
5	Разрешение экрана	1280*1024	1920*1080

Для визуализации процесса взаимодействия манипулятора с объектами внешней среды имитационная программа должна в каждый момент времени вычислять положение и ориентацию в пространстве виртуальной 3D модели антропоморфного манипулятора и виртуальных объектов внешней среды, с учетом их массогабаритных и физических характеристик. Расчет должен выполняться с использованием формул, описывающих физическое поведение тел в реальном мире.

Таким образом, в состав имитационной модели должны входить вспомогательные модули для отображения трехмерных моделей (графический двигатель) и расчета их взаимодействия на основе физических законов в виртуальном пространстве (физический двигатель). Так как разработка программной части выполняется с использованием языка программирования C# и базируется на платформе Microsoft.NET, используемые вспомогательные модули так же должны поддерживать эту платформу. В качестве вспомогательных модулей выбраны бесплатно распространяемые и высокопроизводительные библиотеки SharpDX и BulletSharpPhysicsEngine.

BulletSharpPhysicsEngine – адаптация бесплатного физического двигателя реального времени Bullet к платформе Microsoft .NET. Bullet активно используется в компьютерных играх, фильмах, программах трёхмерного моделирования, в качестве компонента других игровых двигателей и во множестве других более специфичных случаев. Высокая производительность позволяет изменять масштаб времени посредством увеличения и уменьшения количества итераций расчета в единицу времени работы имитационной программы.

SharpDX предоставляет доступ к программному интерфейсу MicrosoftDirect3D для программ, основанных на платформе Microsoft .NET. Программный интерфейс MicrosoftDirect3D предназначен для высокопроизводительной визуализации графической информации в операционных системах семейства Windows.

В качестве метода визуализации использован широко распространенный, поддерживаемый большинством архитектур видеоускорителей метод сканирования строк (Scanlinerendering). Алгоритм метода приведен на рис.53.

Данный алгоритм способен выполняться непосредственно на графическом процессоре ЭВМ, без программного вмешательства, что позволяет визуализировать виртуальное пространство имитационной программы без задействования центрального процессора и выдавать приемлемый результат (рис. 54), редактирование модели манипулятора производится в интерфейсе (рис. 55).

Движение виртуального манипулятора AP и физические расчеты результатов его взаимодействия с объектами окружающей среды выполняются на основе команд управления.

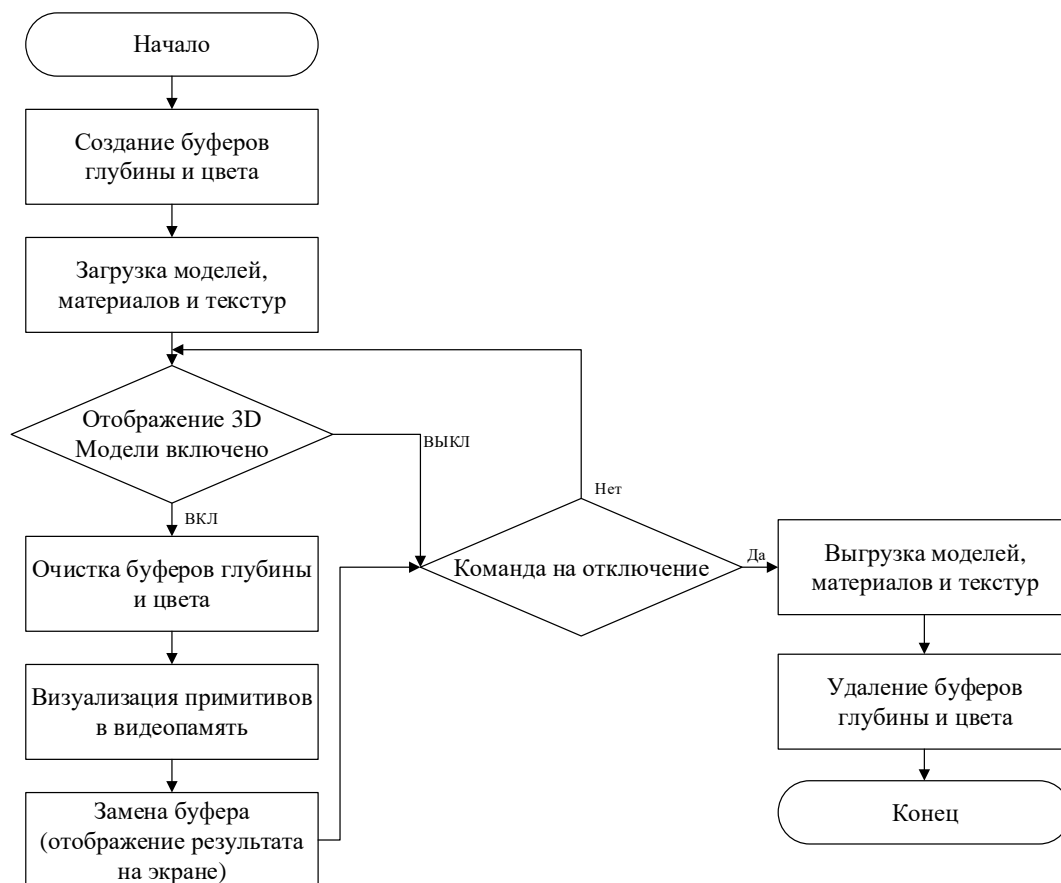


Рисунок 53 – Алгоритм метода сканирования строк

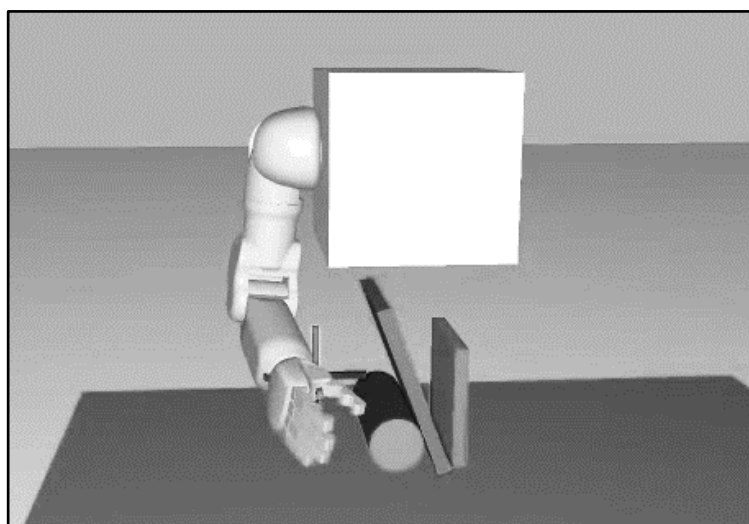


Рисунок 54 – Пример визуализации взаимодействия манипулятора AR и объектов внешней среды

Ввод команд управления манипулятора AR осуществляется посредством сетевого соединения имитационной модели и программы, формирующей команды управления. Команды управления передаются в виде массивов

значений углов поворота в каждой из степеней подвижности АР. Тип данных элементов массива – float. Последовательность значений в массиве соответствует последовательности степеней подвижности манипулятора АР в направлении от основания к схвату манипулятора АР. После каждой принятой команды управления, имитационная модель передает программе, формирующей команды управления, байт со значением 1 или 0, в зависимости от успешного и неудачного получения данных, соответственно. Команды управления применяются непосредственно к виртуальным объектам, обрабатываемым физическим двигателем, поэтому пользовательский интерфейс управления физическим двигателем (запуск, остановка симуляции, масштабирование времени) и приема команд управления выполнены в одном графическом окне (рис. 56). В группе элементов, управляющих физическим двигателем, также расположен элемент управления масштабом времени.

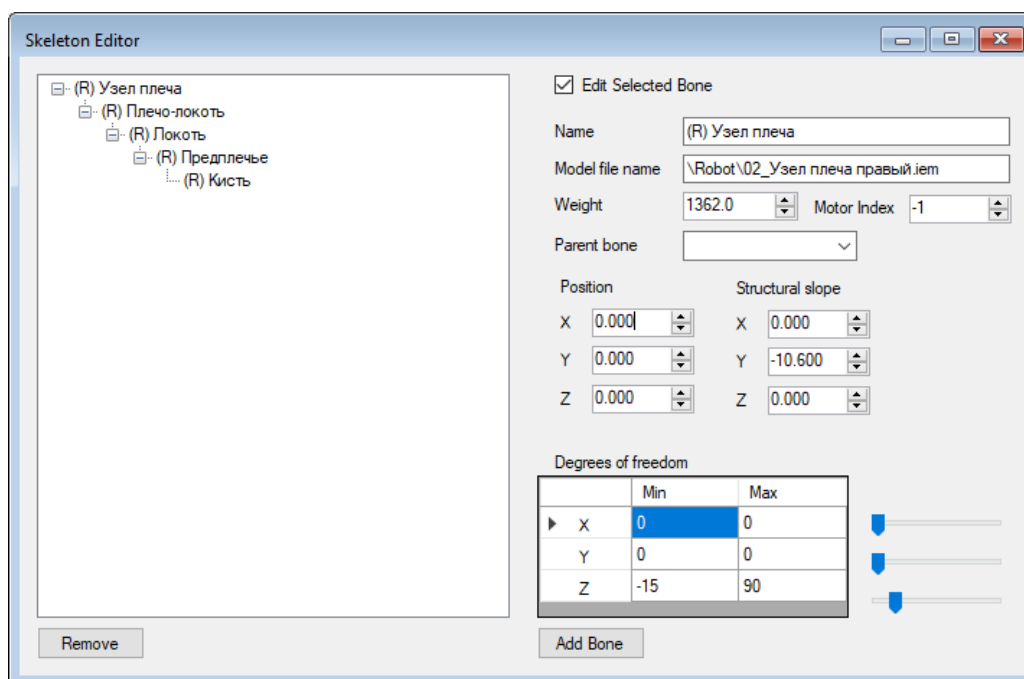


Рисунок 55 – Окно редактирования модели манипулятора АР

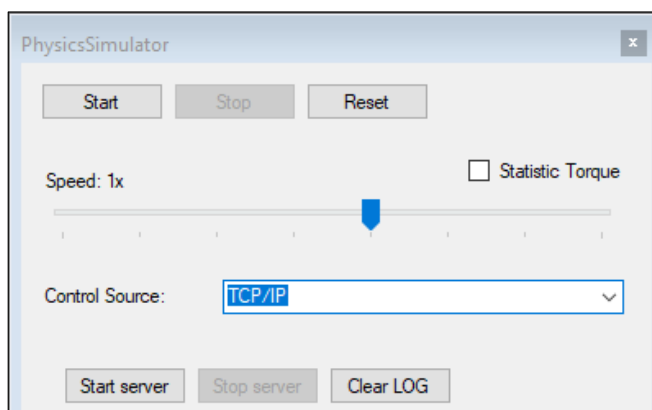


Рисунок 56 – Окно управления физическим двигателем и приемом команд управления

Таким образом, имитационная программа для моделирования взаимодействия манипулятора АР с объектами внешней среды может быть привязана к любому типу управления, включая задание команд с ЭК.

4.3 Имитационная модель задающего устройства для виртуальной отработки команд управления манипулятором антропоморфного робота

Имитационное моделирование состоит из двух больших этапов: создания модели и анализа полученных с помощью модели результатов с целью принятия решения.

Сначала разработчик модели должен определить, какие задачи будут решаться с ее помощью, т.е. моделированию в любой его форме должна предшествовать формулировка цели моделирования. От цели зависит то, какие процессы в реальной системе следует выделить и отразить в модели, а от каких процессов абстрагироваться, какие характеристики этих процессов учитывать, а какие – нет, какие соотношения между переменными и параметрами модели должны быть отражены в модели. Данный этап можно охарактеризовать как создание концептуальной (содержательной) модели. На нем происходит структуризация модели, т.е. выделение отдельных подсистем, определение

элементарных компонентов модели и их связей на каждом уровне иерархии.

Целью моделирования в данном случае является разработка виртуального инструмента, который позволит провести анализ точности обобщенного алгоритма обработки информации с ЭК для управления манипулятором AP.

Следующий этап – это калибровка или идентификация модели, т.е. сбор данных и проведение измерений тех характеристик в реальной системе, которые должны быть введены в модель в виде значений параметров и распределений случайных величин. Далее, необходимо выполнить проверку правильности модели (ее валидацию), которая состоит в том, что выход модели проверяется на нескольких тестовых режимах, в которых характеристики поведения реальной системы известны либо очевидны. Последним этапом работы с моделью является компьютерный эксперимент, который будет проведен на этапе экспериментальных исследований.

Этапы компьютерного моделирования имитационной модели пространственного положения звеньев задающего устройства отражены в таблице 9.

Таблица 9 – Этапы компьютерного моделирования

№ п/п	Название этапа	Результат
1	Анализ системы	Понимание того, как происходит управление экзоскелетом, какова структура экзоскелета, какие процессы протекают в системе управления
2	Формулировка цели моделирования системы	Имитационная модель должна отображать решение прямой задачи кинематики в виде реально изменяющихся во времени движений 3D-модели физического объекта
3	Разработка концептуальной структуры модели	Рычажный механизм с размерами звеньев аналогичных антропометрическим параметрам человека, без подробной конструкторской проработки
4	Реализация модели в среде моделирования	Перемещение звеньев модели в соответствии с разработанной кинематической схемой экзоскелета
5	Реализация анимационного представления модели	Анимационное представление модели, интерфейс пользователя
6	Проверка корректности реализации модели	Убеждение в том, что модель корректно отражает процессы, протекающие при управлении экзоскелетом
7	Калибровка модели	Фиксация нулевого положения звеньев экзоскелета и соответствующих им звеньев имитационной модели

8	Планирование и проведение компьютерного эксперимента	Оценка соответствия углов поворота звеньев имитационной модели углам поворота звеньев экзоскелета (оценка точности)
---	--	---

4.3.1 Разработка имитационной модели

Имитационная модель предназначена для создания кинематической модели любого объекта с физическими свойствами, соответствующими объекту. Подстройка имитационной модели под экзоскелет осуществлялась посредством её конфигурирования. При этом задавались следующие параметры:

- возможные направления перемещения звеньев экзоскелета;
- вес элементов трения объекта;
- упругость;
- свободы объекта по вращению;
- свободы объекта по перемещению;
- ограничения по перемещению.

Пространственное положение звеньев задающего устройства определяется в имитационной модели на основе решения прямой задачи кинематики. При этом решение прямой задачи кинематики отображается в виде реально изменяющихся во времени движений 3D-модели физического объекта.

Динамические процессы, происходящие в реальной системе, отображаются в имитационной модели как смещение звеньев задающего устройства относительно его начального положения. Динамика изменения положений звеньев задающего устройства в пространстве использует следующие входные данные:

- геометрические параметры звеньев задающего устройства;
- значение начальных обобщенных координат для звеньев ЗУКТ;
- обобщенные координаты задающего устройства в моменты его перемещения с заданной частотой дискретизации.

Исходные данные подаются в имитационную модель с заданной частотой дискретизации энкодеров. Значения углов поворота звеньев преобразуются в

значения координат посредством решения прямой задачи кинематики, аналогично, и выводит данные об изменении положения звеньев в пространстве на имитационную модель.

Основными методами описания динамических процессов, происходящих в реальной системе, являются:

- численное представление значений динамического процесса;
- табличное представление значений динамического процесса;
- графическое представление динамического процесса;
- аналитическое представление динамического процесса.

В настоящей работе для описания динамических процессов используется метод численного представления временных рядов, значения которых получены в виде значений углов поворота звеньев ЗУ через энкодеры, либо в виде изменяющихся координат звеньев ЗУ посредством решения прямой задачи кинематики представлением Денавита-Хартенберга. Визуальное представление динамики изменения значений временных рядов отображено в предлагаемой имитационной модели.

Разработанная имитационная модель пространственного положения звеньев задающего устройства представлена на рисунке 57. Разработанная имитационная модель пространственного положения звеньев задающего устройства соответствует структурной и кинематической схеме экзоскелета (рис. 58), конструкция которого соответствует задающему устройству копирующего типа ЗУКТ-3 от АО «НПО «Андроидная техника». Примерный вид конструкции с основными метрическими параметрами представлен на рисунке 59. Имитационная модель позволяет проверить характер перемещения звеньев задающего устройства в условиях неопределенности.

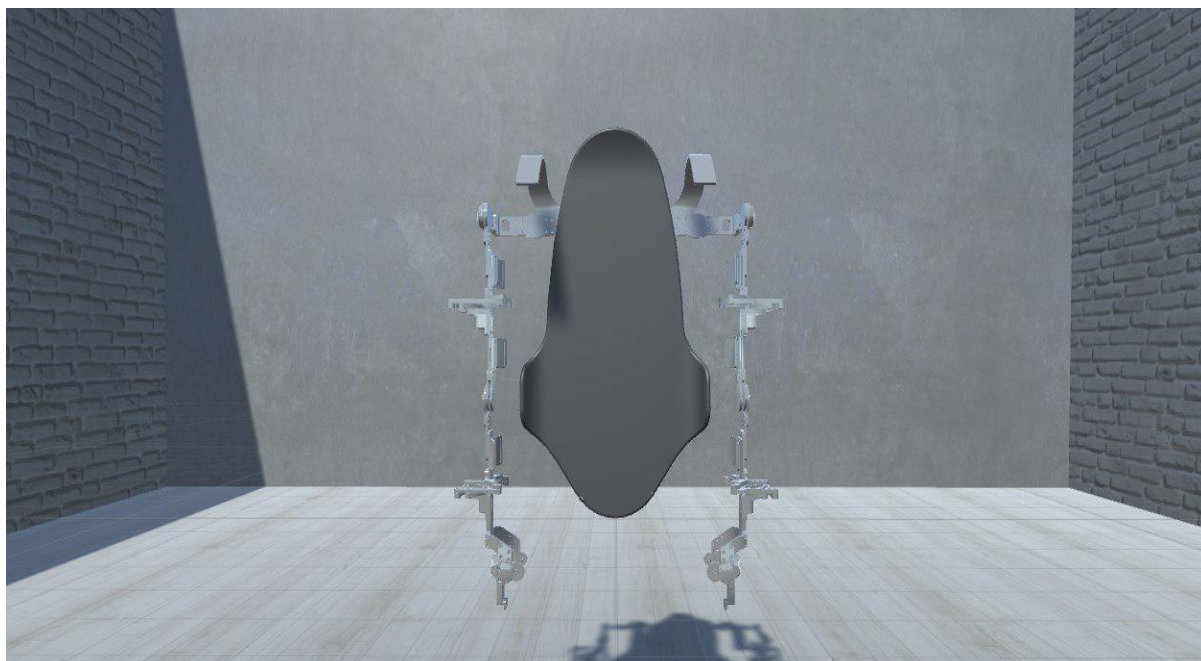


Рисунок 57 – Имитационная модель пространственного положения звеньев задающего устройства

В имитационной модели пространственного положения звеньев задающего устройства реализованы перемещения в плечевом, локтевом и лучезапястном суставах, данные перемещения демонстрируются в Приложении А. В общей сложности реализованы по 7 степеней подвижности: 3 – в плечевом, 2 – в локтевом и 2 – в лучезапястном суставе.

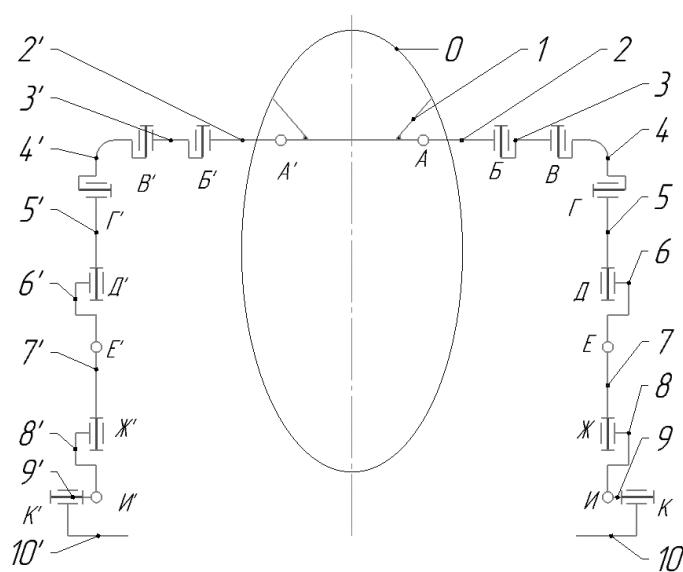


Рисунок 58 – Общая кинематическая схема экзоскелета

Оценка соответствия углов поворота звеньев имитационной модели углам поворота экзоскелета проводилась на имеющемся в распоряжении АО «НПО «Андроидная техника» экзоскелете аналогичной рычажной конструкции.

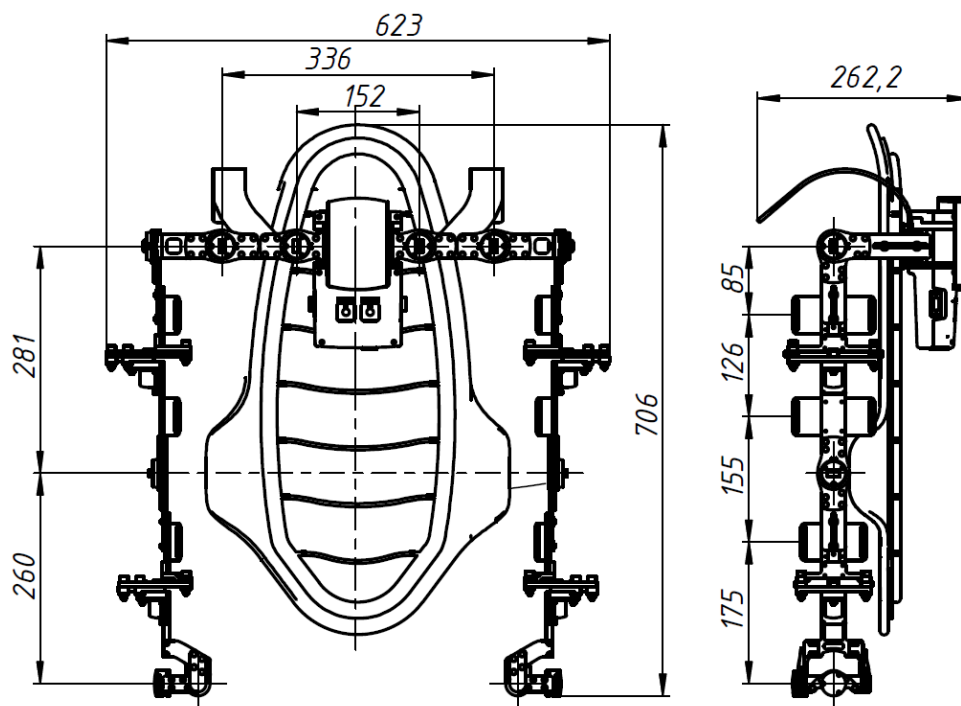


Рисунок 59 – Основные метрические параметры

4.3.2 Разработка пользовательского интерфейса

Разработка пользовательского интерфейса имитационной программы проводится в несколько этапов:

- проектирование, включает в себя определение целей разработки и исходных требований, разработку сценариев, моделирование, определение информационных потоков и выбор платформы;
- реализация, включает в себя разработку интерактивных макетов экранных форм и создание приложения;
- тестирование и отладка приложения.

Цель разработки пользовательского интерфейса имитационной программы – создание удобного для использования пользователей различного уровня подготовки инструмента для работы с имитационной моделью задающего устройства.

Исходные требования: наглядное отображение имитационной модели задающего устройства, возможность подключения к виртуальной или реальной модели экзоскелета.

В качестве платформы для разрабатываемой в рамках проекта имитационной программы выбрана операционная система семейства Linux.

В программу включен следующий функционал: диагностика экзоскелета в реальном режиме времени, проверка работоспособности энкодеров, калибровка, просмотр значений энкодеров, построение графиков энкодеров, работа с экзоскелетом, сохранение логов и т.д.

У имитационной программы есть два режима работы: оператор и администратор (эксперт). Вначале программа запускается в режиме оператора. Это ограниченный режим, в котором нельзя редактировать конфигурационный файл. Для более полного функционала необходимо войти в расширенный режим «эксперта»: «Интерфейс» – «Эксперт» [109].

Примерный вид пользовательского интерфейса имитационной программы изображен на рисунке 60.

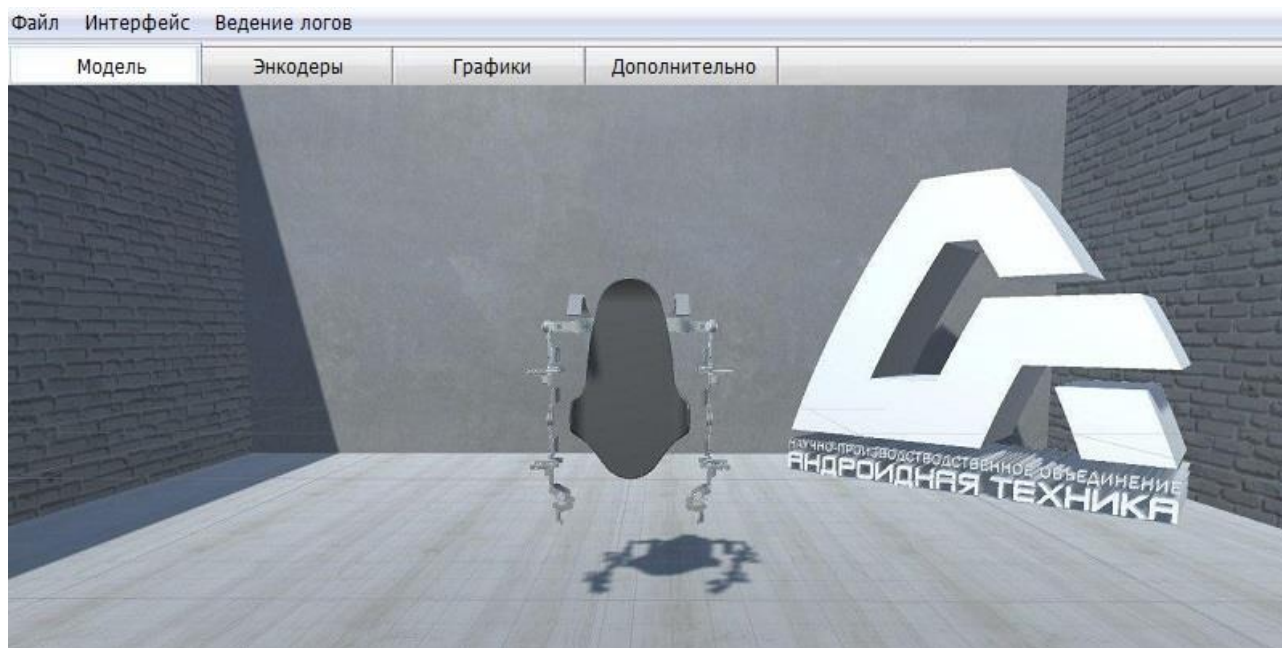


Рисунок 60 – Пользовательский интерфейс имитационной программы

Структура пользовательского интерфейса включает в себя следующие элементы:

- Панель меню.
- Панель вкладок.
- Рабочее поле.

Панель меню содержит имена групп команд, объединенных по функциональному признаку. Панель меню находится в верхней части экрана. Выбор режима из меню открывает соответствующее подменю, а выбор определенной опции в нем обеспечивает доступ к меню более низкого уровня. Команды меню выбираются с помощью мыши, клавиш управления курсором или комбинаций нажатия определенных клавиш («горячих клавиш»). Структура меню схематично представлена на рисунке 61.

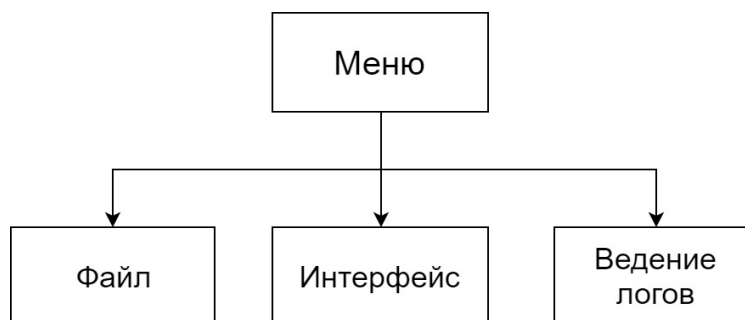


Рисунок 61 – Структура разделов панели меню

Панель меню состоит из следующих разделов:

1. Файл:

- Загрузить конфигурацию. Загружает конфигурационный файл, отличный от файла по умолчанию `config.ini`.
- Сохранить конфигурацию. Сохранить конфигурационный файл на диск для дальнейшего использования.
- Параметры подключения. Настройка подключения к экзоскелету.
- Выход. Завершение работы программы.

2. Интерфейс:

– Пользователь. Интерфейс оператора оболочки, загружается по умолчанию.

– Эксперт. Уровень администратора оболочки, предоставляющий расширенные возможности.

3. Ведение логов:

– Датчики. Запись значений датчиков.

– Входящий буфер. Запись всего буфера.

– Напряжение и ток. Запись значений напряжения и тока на линиях.

– Запись. Запись лог файла на диск. Файл записывается в текущую директорию. В его имени содержится время и дата записи.

На рисунке 62 показан примерный вид раздела Файл панели меню.

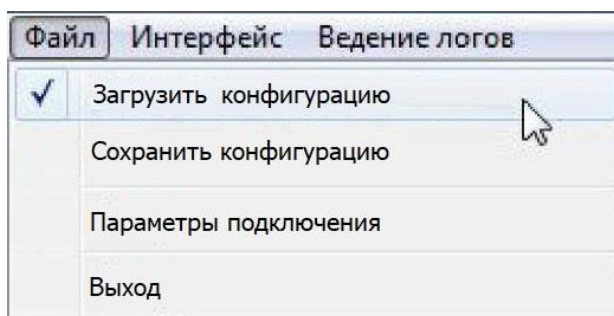


Рисунок 62 – Примерный вид раздела панели меню

Панель вкладок представляет собой список элементов графического интерфейса, который позволяет в одном окне приложения переключение между несколькими predetermined наборами элементов интерфейса, когда их доступно несколько, а на выделенном для них пространстве окна можно показывать только один из них. Схематически панель вкладок представлена на рисунке 63.

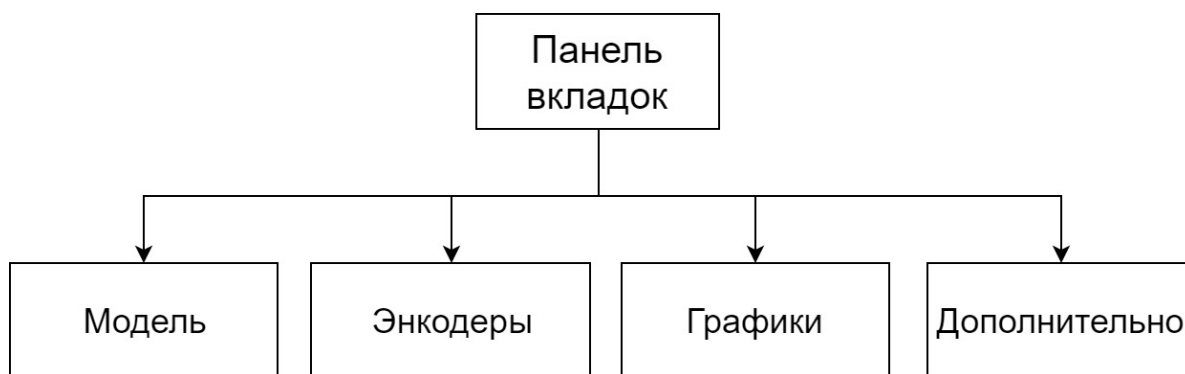


Рисунок 63 – Схематическое представление панели вкладок

Панель вкладок состоит из следующих элементов:

4. **Модель.** На данной вкладке изображена виртуальная модель робота. При нормальной работе программного комплекса виртуальная модель соответствует физической. Виртуальная модель строится по показаниям энкодеров, поэтому если она не соответствует физической, то необходима настройка (калибровка) экзоскелета. Нулевое положение экзоскелета показано на рисунке 53. Однако, стартовая позиция может отличаться от нулевой.

5. **Энкодеры.** В данной вкладке представлены актуальные данные по энкодерам. В режиме эксперта будет выводиться больше информации. Также, в этом режиме предусмотрена возможность вносить изменения по энкодерам в конфигурационный файл.

6. **Графики.** В данной вкладке графики отображают значения энкодеров в реальном времени. Для управления графиком служит специальное меню управления, которое позволяет:

- указывать «Количество точек» отсчета, отображаемых на экране;
- ставить отображение графиков на «паузу»;
- включить/отключать «Автомасштабирование»;
- «Очистить» экран и начинать вывод графиков с начала (помогает при выходе значений графиков за большие диапазоны).

7. **Дополнительно.** В данную вкладку вынесены вспомогательные функции:

- «Стартовая позиция», которая возвращает экзоскелет в первоначальное положение;
- «Калибровка энкодеров», которая переопределяет текущие значения энкодеров как нулевые.

Рабочее поле (рис. 64) представляет собой пространство на экране дисплея, на котором отображается разработанная имитационная модель. Максимальный размер рабочего поля определяется стандартными параметрами монитора и составляет 25 строк по 80 знаков каждая.

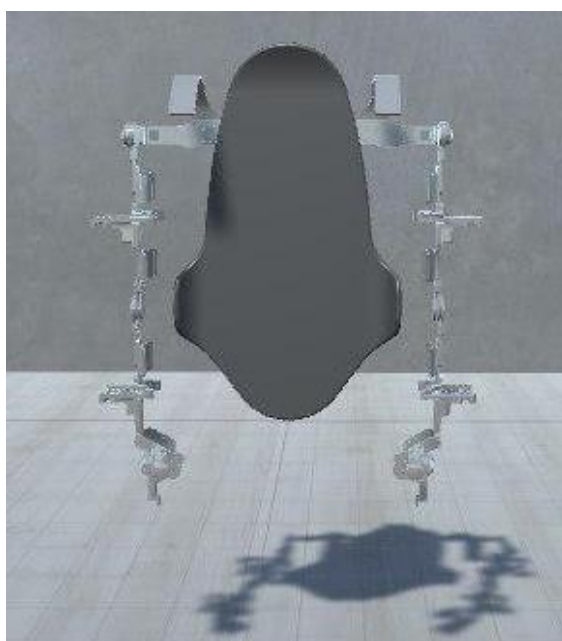


Рисунок 64 – Рабочее поле имитационной программы

Прежде чем приступить к работе с экзоскелетом, следует установить с ним связь. Для этого в раскрывающейся вкладке «Параметры подключения» необходимо указать IP адрес и порт экзоскелета, а также порт локального компьютера, с которого производится подключение (рис. 65).

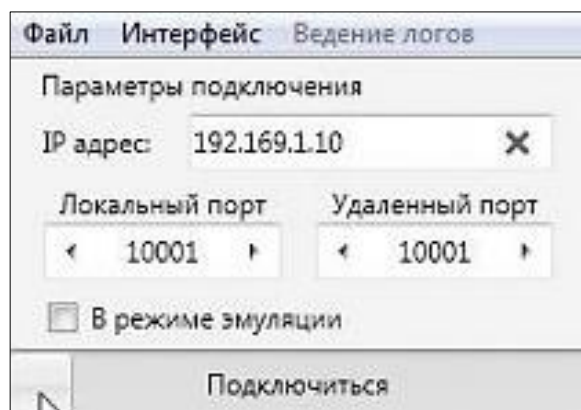


Рисунок 65 – Параметры подключения

После подключения в строчке «Подключиться» подсветится количество пакетов, принимаемых и отправляемых роботу в секунду. После начала обмена пакетами с экзоскелетом следует сравнить физическое положение экзоскелета с виртуальной моделью во вкладке «Модель», которая открывается по умолчанию. Если виртуальная модель не совпадает с реальной моделью, то необходима калибровка экзоскелета. При совпадении моделей можно попробовать поставить экзоскелет в нулевую позицию. Программный код пользовательского интерфейса имитационной программы приведен в Приложении Б.

4.3.3 Проверка работоспособности имитационной модели задающего устройства

Для проверки работоспособности имитационной программы использовался имеющийся в наличии у АО «НПО «Андроидная техника» экзоскелет схожей конструкции. Взаимодействие оператора в надетом экзоскелете и имитационной программы изображено на рисунках 66, 67. В имитационную программу загружена имитационная модель, разработанная АО «НПО «Андроидная техника».

При перемещении руки в соответствующем направлении происходит передвижение звеньев имитационной модели задающего устройства на

заданный угол. При этом виртуальные углы ограничены заданными значениями углов поворота рычажной системы приведены в таблице 10.

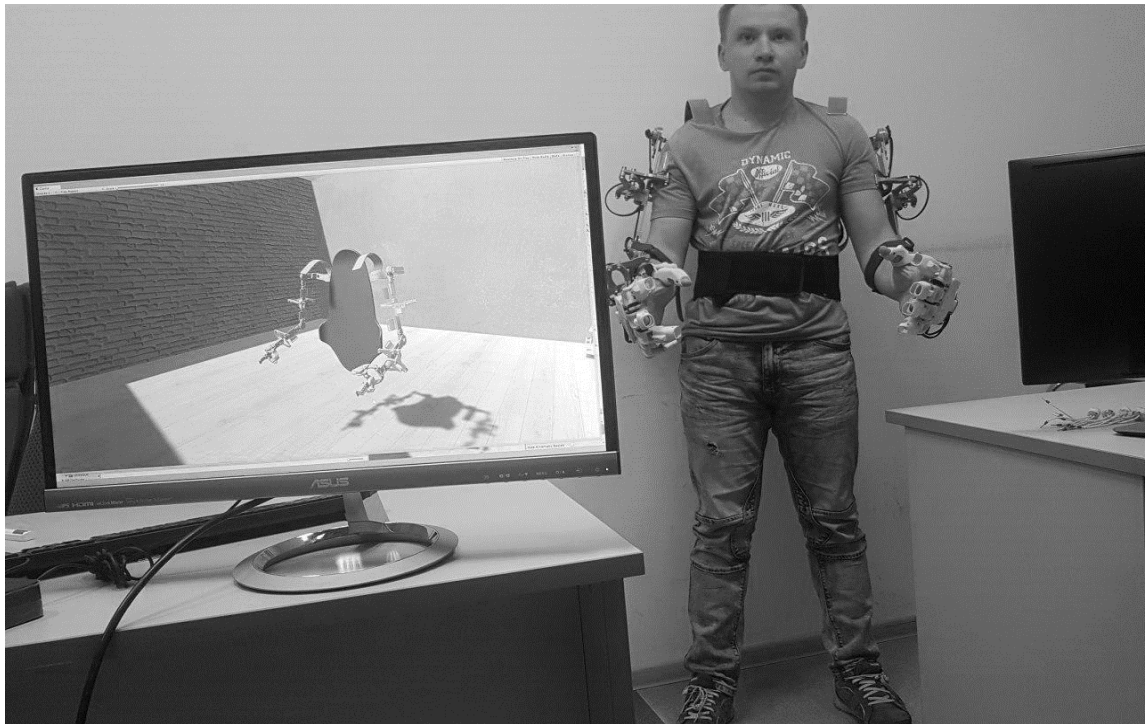


Рисунок 66 – Взаимодействие имитационной программы и оператора

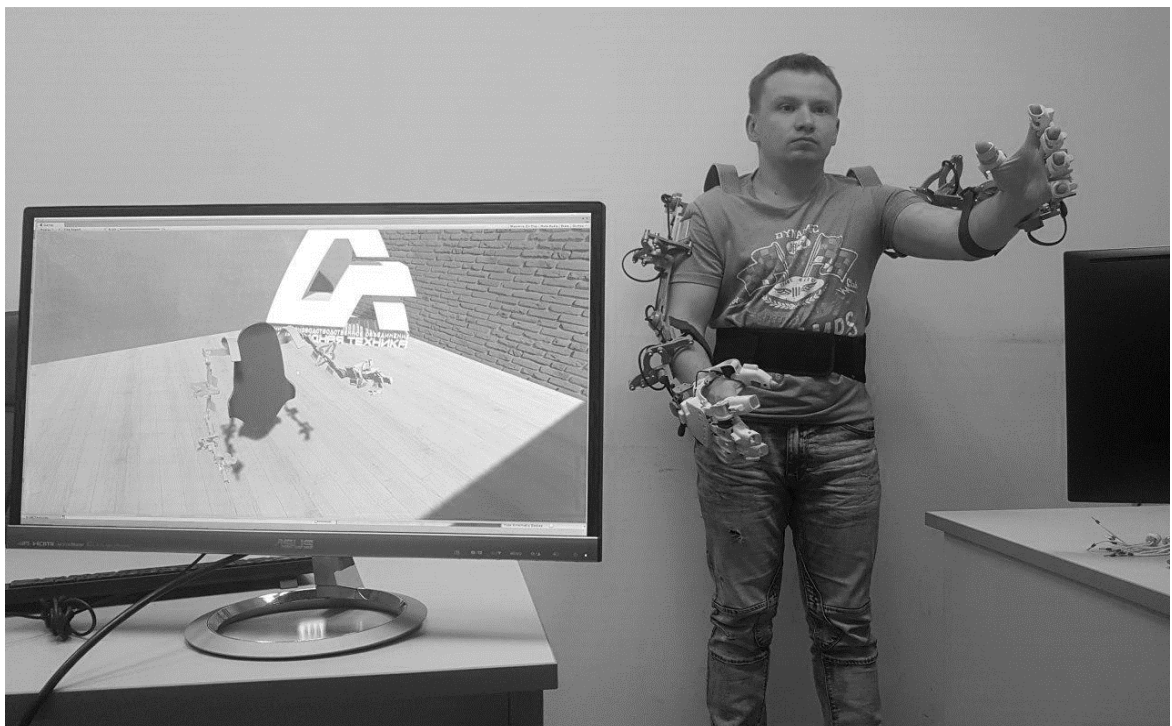
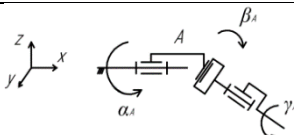
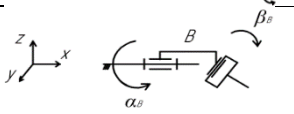
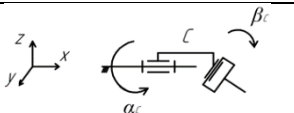


Рисунок 67 – Взаимодействие имитационной программы и оператора при перемещении руки

Таблица 10 – Углы поворота рычажной системы

Рычажная система	Графическое обозначение	Углы поворота
Аналог плечевого сустава		α_A 0...+90°
		β_A -20...+90°
		γ_A 0...+90°
Аналог локтевого сустава		α_B 0...+110°
		β_B -90...+45°
Аналог лучезапястного сустава		α_C -30...+30°
		β_C -70...+70°

Проверка работоспособности осуществлялась в соответствии с движениями, приведенными на рисунках 68, 69.

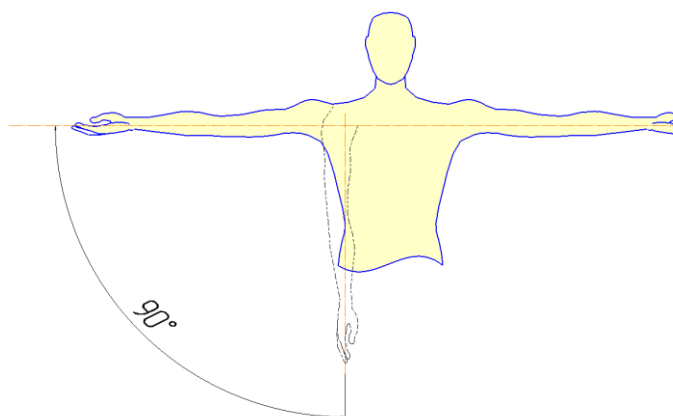


Рисунок 68 – Степени подвижности во фронтальной плоскости

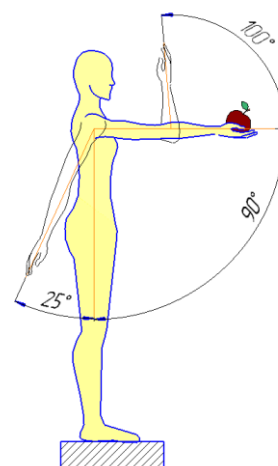


Рисунок 69 – Степени подвижности в сагиттальной плоскости

Интервал опроса между измерениями показаний датчиков угла поворота экзоскелета, использованного для тестирования, составляет 240 мкс. Так как датчики опрашиваются последовательно друг за другом и требуют преобразования аналоговых сигналов в цифровые, опрос происходит один раз за цикл. В начале работы программы значению каждого датчика присваивается переменная, значение которой обновляется только при изменении значения предыдущего показания датчика. Такой алгоритм позволяет не перегружать

память и дает возможность оценить полноту опроса датчиков. Результат проверки полноты опроса датчиков представлен на рисунке 70.

Согласно результату проверки полноты опроса датчиков, значения энкодеров безошибочно передаются в имитационную программу. Однако, следует учитывать точность датчиков используемого экзоскелета при считывании значений углов поворота, которая составляет 0,03%.

Протокол передачи данных UDP, не может обеспечить гарантированную доставку пакетов данных. На основе анализа принятых/переданных пакетов данных можно сделать вывод о том, что процент потери пакетов данных при передаче от датчиков составляет 0,03% (рис. 71).

```
SN: 3; PRS= 99640; TMP= 26.4; U= 4.0; STATUS= 0;<CR><LF>
AX: 3; X=-14800; Y= 6928; Z= -1072;<CR><LF>
MG: 3; X= 720; Y= 34; Z= -992;<CR><LF>
GPS: 3; LAT=0.000000; LON=0.000000; ALT= 0.00; DATE= 0; TIME=-15852; VALID= 0;<CR><LF>
SN: 4; PRS= 99640; TMP= 26.5; U= 4.0; STATUS= 0;<CR><LF>
AX: 4; X=-14736; Y= 6832; Z= -1120;<CR><LF>
MG: 4; X= 730; Y= 44; Z= -1010;<CR><LF>
GPS: 4; LAT=0.000000; LON=0.000000; ALT= 0.00; DATE= 0; TIME=-15852; VALID= 0;<CR><LF>
SN: 5; PRS= 99748; TMP= 26.5; U= 4.0; STATUS= 0;<CR><LF>
AX: 5; X=-14640; Y= 6848; Z= -1200;<CR><LF>
MG: 5; X= 718; Y= 34; Z= -986;<CR><LF>
GPS: 5; LAT=0.000000; LON=0.000000; ALT= 0.00; DATE= 0; TIME=-15552; VALID= 0;<CR><LF>
SN: 6; PRS= 99640; TMP= 26.5; U= 3.9; STATUS= 0;<CR><LF>
AX: 6; X=-14656; Y= 6752; Z= -1056;<CR><LF>
MG: 6; X= 719; Y= 35; Z= -996;<CR><LF>
```

Рисунок 70 – Результат проверки полноты опроса датчиков

С другой стороны, преимуществом использования UDP являются существенно меньшие нагрузки по сравнению с протоколом TCP; за счет того, что он не использует установление соединения и не предлагает сложные

механизмы повторной передачи данных, упорядочивания и управления потоком, которые обеспечивают надёжность.

Таким образом, использование протокола позволяет достичь необходимой частоты передачи результатов измерений углов поворота экзоскелета. Достигнута частота передачи порядка 4 кГц.

На основе анализа принятых/переданных пакетов данных сделан вывод о том, что процент потери пакетов данных при передаче от датчиков составляет 0,11% (рис. 71).

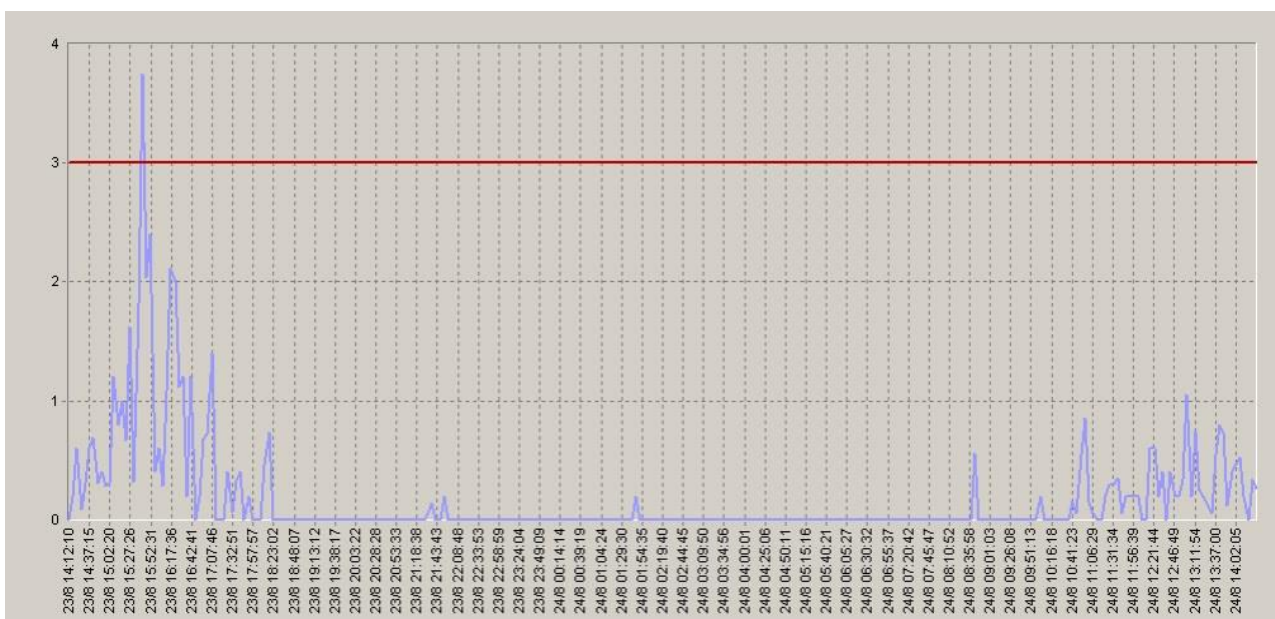


Рисунок 71 – Статистика принятых/переданных пакетов данных по протоколу UDP

Данная проблема потери пакетов может быть решена путем многократной передачи одного пакета. При передаче одного пакета 10 раз частота передачи повышается до 1 кГц. Однако, вероятность потери всех 10 копий составляет $0,0011^{10}$, что является ничтожно малой величиной.

Таким образом, потерянные пакеты не снижают точности работы имитационной модели. Тем не менее, необходимо учитывать, что точность результатов расчета пространственного положения звеньев задающего устройства имитационной модели зависит от исходных данных, собранных с

датчиков экзоскелета. Результаты проверки датчиков занесены в таблицу 11.

Таблица 11 – Результат тестирования датчиков

Критерий	Значение
Интервал углов поворота	0
Полнота опроса датчиков	0
Потеря пакетов данных	0,0011 ¹⁰
Точность показаний датчиков углов поворота	0,03%

Необходимо учитывать, что точность результатов расчета пространственного положения звеньев задающего устройства имитационной модели зависит от исходных данных, собранных с датчиков экзоскелета. Результаты проверки датчиков занесены в таблицу 11.

Таким образом, можно сделать вывод о не критичности ошибок функционирования имитационной программы.

4.3.4 Оценка соответствия углов поворота звеньев имитационной модели углам поворота экзоскелета

Оценка соответствия углов поворота звеньев имитационной модели углам поворота экзоскелета проводилась на имеющемся в распоряжении АО «НПО «Андроидная техника» экзоскелете аналогичной рычажной конструкции [109].

Проверка проводилась в следующей последовательности:

Экзоскелет надет на оператора. Исходное положение – руки опущены вниз и направлены вдоль тела оператора. Положение звеньев имитационной модели – направлены вниз (угол отклонения от вертикальной оси – 0 градусов).

1. Измерить угол раскрытия локтевого сустава экзоскелета с помощью электронного угломера. Данные занести в таблицу.

2. Измерить угол раскрытия локтевого сустава имитационной модели. Данные занести в таблицу.

3. Согнуть локтевой сустав экзоскелета на 10 градусов. Точность угла поворота локтевого сустава контролировать угломером. Полученное значение занести в таблицу.

4. Измерить угол раскрытия локтевого сустава имитационной модели. Данные занести в таблицу 12.

Таблица 12 – Соответствие углов поворота локтевого и плечевого суставов экзоскелета и имитационной модели

№ п/п	Угол поворота локтевого сустава экзоскелета, град.	Угол поворота локтевого сустава имитационной модели, град.	Точность		Угол поворота плечевого сустава экзоскелета, град.	Угол поворота плечевого сустава имитационной модели, град.	Точность	
			Абсолютная, град.	Относительная, %			Абсолютная, град.	Относительная, %
1	10	10,17	0,17	1,7	5	5,26	0,26	5,2
2	15,4	15,64	0,24	1,56	10	10,26	0,26	2,6
3	20,1	20,79	0,69	3,4	15	15,37	0,37	2,47
4	25	24,92	0,06	0,24	20	20,56	0,56	2,8
5	30	30,19	0,19	0,63	25	25,74	0,74	2,96
6	45	45,46	0,46	1,02	30	31,53	1,53	5,1
7	90	89,39	0,61	0,68	45,1	45,76	0,66	1,46
8	-	-	-	-	90,1	89,99	0,11	0,12

5. Повторить п.п. 4-5 четыре раза.

6. Вернуть ЭК и имитационную модель в исходное положение (см. п.1).

7. Измерить угол раскрытия плечевого сустава экзоскелета с помощью электронного угломера. Данные занести в таблицу.

8. Измерить угол раскрытия плечевого сустава имитационной модели. Данные занести в таблицу.

9. Повернуть плечевой сустав экзоскелета на 10 градусов. Точность угла поворота плечевого сустава контролировать угломером. Полученное значение занести в таблицу.

10. Измерить угол раскрытия плечевого сустава имитационной модели. Данные занести в таблицу.

11. Повторить п.п. 10-11 четыре раза.

12. Сравнить полученные значения. Полученные результаты отражены в таблице 15 и проиллюстрированы на рисунке 72.

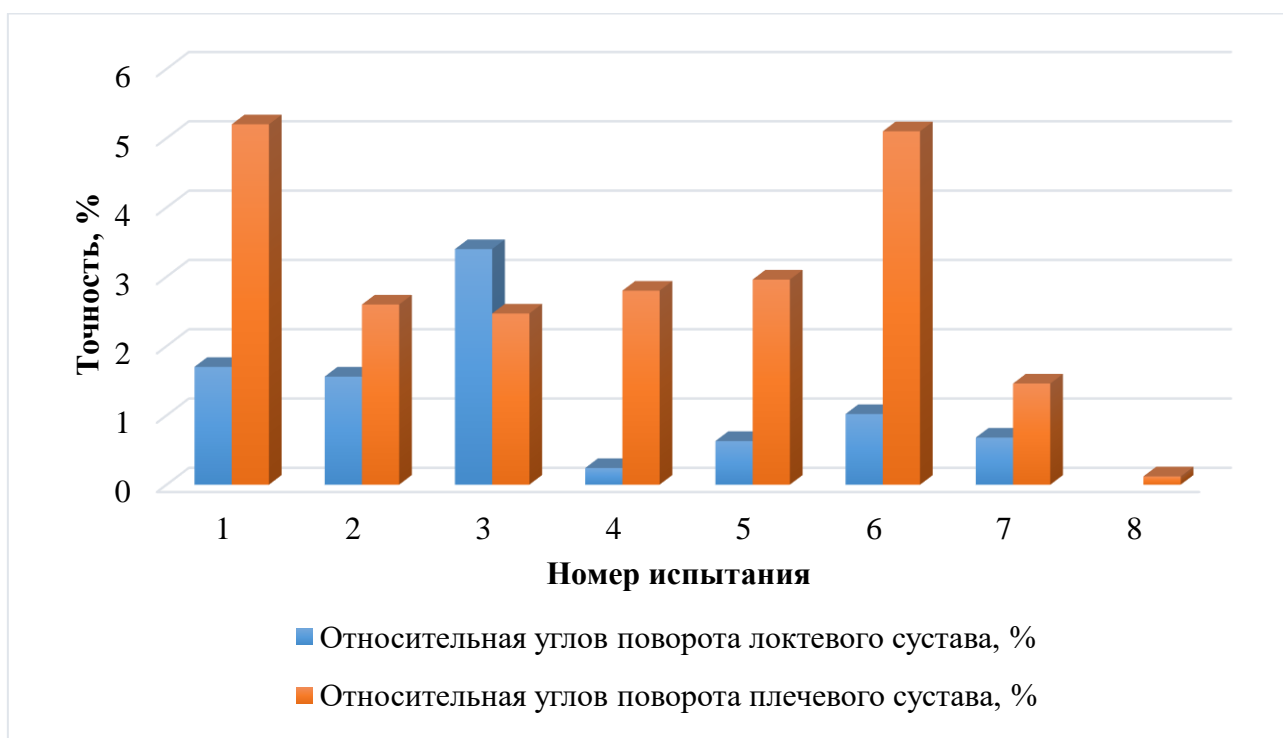


Рисунок 72 – Оценка соответствия углов поворота звеньев имитационной модели углам поворота экзоскелета

Таким образом, получены следующие результаты: точность показаний углов поворота локтевого сустава экзоскелета и имитационной модели не превышает 3,4%, плечевого и имитационной модели – 5,2%, что позволяет ее использовать для решения задач отработки действий в виртуальном пространстве, как при использовании старого, так и при новом алгоритме обработки информации с ЭК.

4.4 Выводы по разделу

В разделе приведены практические рекомендации к внедрению результатов исследования в реальной системе копирующего управления

манипуляторами АР. Сформирована структура системы копирующего управления манипуляторами АР с использованием ЭК. Основная программа, осуществляет общую координацию работы модуля сбора данных и модуля регистрации углов поворота руки оператора. Данная программа имеет графический интерфейс для ввода пользователем входных данных или выбора одного из сохраненных наборов.

В разделе исследованы этапы разработки имитационной программы, определены цель и требования для проектирования пользовательского интерфейса имитационной программы. Представлена структура интерфейса программы, состоящая из трех основных компонентов: панель меню, панель вкладок и рабочее поле. Описан функционал элементов пользовательского интерфейса имитационной программы, а также режимы работы имитационной программы. Проверка работоспособности имитационной модели ЭК показала потерю пакетов данных и точность показаний датчиков углов поворота равным $0,0011^{10}$ и $0,03\%$ соответственно.

Проведена отработка антропоморфным манипулятором задаваемых оператором углов поворота. Точность показаний углов поворота локтевого сустава экзоскелета и имитационной модели не превышает $3,4\%$, плечевого и имитационной модели – $5,2\%$, что говорит об успешном построении имитационной модели и возможности ее использования при виртуальной отработке движений оператора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе разработаны методы и алгоритмы обработки информации при копирующем управлении манипуляторами АР с ЭК для повышения точности выполнения целевых операций.

Проанализированы способы формирования команд управления манипулятором АР в недетерминированной среде и способы взаимодействия оператора с АР. На основе проведенного анализа представлено обоснование зависимости обобщенных координат рычажного механизма ЭК с избыточной подвижностью и проведен анализ методов решения задач кинематики применительно к расчету координат руки оператора. Исходя из результатов анализа, сделан вывод о недостаточности текущего классического алгоритма обработки информации с ЭК, что говорит о необходимости разработки методов и алгоритмов для обработки информации с ЭК при копирующем управлении манипуляторами АР с целью повышения точности выполнения целевых операций.

В диссертации на защиту выносятся:

1. Метод оценки точности выполнения целевых операций манипулятором антропоморфного робота при копирующем управлении с экзоскелетного комплекса, основанный на параметрах сравнения по степени выпрямления, по радиус-вектору центра ладони, по углам Эйлера кисти и плоскости, проходящей через суставы руки оператора, и аналогичные вращательные пары манипулятора антропоморфного робота.

2. Обобщенный алгоритм обработки информации с экзоскелетного комплекса для повышения точности выполнения целевых операций при копирующем управлении манипуляторами антропоморфного робота, который позволяет производить более точный расчет обобщенных координат руки оператора при отсутствии жесткой сцепки в локтевом суставе руки оператора и

экзоскелета.

3. Алгоритм расчета углов поворота руки оператора на основе информации об углах поворота рычажной системы экзоскелетного комплекса и методов решения задач кинематики, который позволяет произвести расчет координат центров суставов руки оператора при отсутствии жесткой сцепки в локтевом суставе.

4. Специальное математическое обеспечение алгоритма обработки информации с экзоскелетного комплекса на основе метода расчета положения центра локтевого сустава руки оператора с использованием геометрического подхода для кинематической цепи с вращательными сочленениями, который позволяет произвести выбор положения локтевого сустава руки оператора при гибкой сцепке с ЭК.

По результатам разработки методов и алгоритмов обработки информации с ЭК для повышения точности выполнения целевых операций при управления антропоморфным манипулятором получены результаты согласно паспорту специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации.

Согласно п.3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

– метод оценки точности выполнения целевых операций манипулятором антропоморфного робота при копирующем управлении с экзоскелетного комплекса (раздел 2, п. 2.1) на основе сравнения степени выпрямления, радиус-вектора центра ладони, углов Эйлера кисти и плоскости, проходящей через суставы руки оператора, и аналогичных параметров манипулятора антропоморфного робота.

Согласно п. 4 – Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации:

– обобщенный алгоритм обработки информации с экзоскелетного комплекса (раздел 2, п. 2.2, 2.5) для повышения точности выполнения целевых операций при копирующем управлении манипуляторами антропоморфного робота, отличающийся от существующих новыми методами расчета взаимоположения суставов руки оператора, углов поворота руки оператора и методами оценки точности выполнения целевых операций.

Согласно п.5. – Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации:

– алгоритм расчета обобщенных координат руки оператора на основе информации об углах поворота рычажной системы экзоскелетного комплекса и методов решения задач кинематики (раздел 2, п. 2.3);

– специальное математическое обеспечение алгоритма обработки информации с экзоскелетного комплекса (раздел 2, п. 2.4) на основе метода расчета положения центра локтевого сустава руки оператора на основе геометрического подхода для кинематической цепи с вращательными сочленениями;

С использованием вышеописанных методов, согласно цели исследования, достигнуты следующие результаты:

– вычислительная сложность метода расчета положения центра локтевого сустава руки оператора и выбора пространственного положения локтевого узла манипулятора составляет 10^4 операций;

– задействованное операционное пространства манипулятора увеличилось в среднем на 7,0%;

– ориентация радиус-вектора центра схвата АМ в пространстве стала ближе к целевой в среднем на $5,7^\circ$;

– точность выполнения целевых операций при копирующем управлении с ЭК повысилась на 8,2 см (с 9,8 см до 1,6 см). По отношению к длине манипулятора повышение точности выполнения целевых операций составляет 14%.

Таким образом, можно считать, что цель исследования – повышение точности выполнения целевых операций при копирующем управлении манипуляторами антропоморфного робота с экзоскелетного комплекса за счет методов и алгоритмов обработки информации является достигнутой.

В перспективе дальнейшее развитие темы диссертационного исследования заключается в модификации предлагаемых методов и алгоритмов обработки информации и метода оценки качества копирующего управления для решения задачи динамики мобильных манипуляционных и промышленных манипуляторов роботов, а также адаптации предлагаемых решений для копирующего управления манипуляторами робота и другими составными частями через экзоскелетные комплексы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 60.0.7.1-2016. Роботы и робототехнические устройства. Методы программирования и взаимодействия с оператором. – Введ. 2018-01-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 11 с.
2. Подураев, Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие для студентов вузов / Ю.В. Подураев. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
3. Теряев, Е.Д. Современный этап развития мехатроники и грядущая конвергенция с нанотехнологиями / Е.Д. Теряев, Н.Б. Филимонов, К.В. Петрин // Мехатроника, автоматизация, управление: материалы II Российской конференции по проблемам управления. – СПб.: Изд-во ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. – С. 9-21.
4. Юревич, Е.И. Основы робототехники: учеб, пособие / Е.И. Юревич // 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 368 с.
5. Исии, Т. Мехатроника / Т. Исии, И. Симояма, Х. Иноуэ и др. // Пер. с япон. – М.: Мир, 1988. – 318 с.
6. Зенкевич, С.Л. Управление роботами, основы управления манипуляционными роботами: учебник для вузов / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 400 с.
7. Егоров, О.Д. Конструирование мехатронных модулей: учебник / О.Д. Егоров, Ю.В. Подураев // М.: Изд-во НЦ МГТУ «СТАНКИН», 2004. – 360 с.
8. Макарова, И.М. Интеллектуальные системы автоматического управления / И.М. Макарова, В.М. Лохина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 576 с.
9. ГОСТ 27696-88. Промышленные роботы. Интерфейсы. Технические требования. – Введ. 1989-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 7 с.
10. ГОСТ 27697-88. Промышленные роботы. Устройства циклового,

позиционного и контурного программного управления. Технические требования и методы испытаний. – Введ. 198-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 10 с.

11. ГОСТ 28732–90. Роботы промышленные. Требования к организации внешних связей с устройствами программного управления. – Введ. 1993-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 14 с.

12. Рябцев, С.С. Представление задачи адаптивного поведения робототехнических систем в пространстве состояний. / С.С. Рябцев, Ф.Б. Тебугева // Студенческая наука для развития информационного общества: материалы V Всероссийской научно-технической конференции. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2016. – С. 599-601.

13. ГОСТ Р 55895-2013. Техника пожарная. Системы управления робототехнических комплексов для проведения аварийно-спасательных работ и пожаротушения. Общие технические требования. Методы испытаний. – Введ. 2014-09-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

14. ГОСТ 24836–81. Устройства программного управления промышленными роботами. Методы кодирования и программирования. – Введ. 1983-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1981. – 6 с.

15. Шеломенцев, Е.Е. Реализация системы управления для антропоморфного манипулятора. / Е.Е. Шеломенцев // Молодежь и современные информационные технологии: материалы XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ИК ТПУ, 2014. – С. 28-29.

16. AL-Dabbagh, R.D. System identification and control of robot manipulator based on fuzzy adaptive differential evolution algorithm / R.D AL-Dabbagh, A. Kinsheel // Advances in Engineering Software. – 2014. – vol. 78. – P. 60-66.

17. Islam, S. Robust adaptive fuzzy output feedback control system for robot manipulators / S. Islam, P.X. Liu // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2011. – vol. 16(2) – P. 288-296.

18. Charith Lasantha Fernando TELESAR V: TELEXistence Surrogate Anthropomorphic Robot / Charith Lasantha Fernando, Masahiro Furukawa, Tadatoshi Kurogi, KyoHirota [et al.] // ACM SIGGRAPH 2012, Emerging Technologies, Los Angeles, CA, USA. – 2012. – С. 1-1. DOI:10.1145/2343456.2343479

19. T-HR3 by TOYOTA // TOYOTA MOTOR CORPORATION GLOBAL WEBSITE. – URL: https://www.toyota-global.com/pages/contents/innovation/partner_robot/robot/file/T-HR3_EN_0208.pdf (дата обращения: 17.02.2019).

20. TELEXISTENCE MODEL H // TELEXISTENCE inc. – URL: <https://tx-inc.com/technology/> (дата обращения: 17.02.2019).

21. MELTANT- α , a cyborg that transcends boundaries // MELTIN MMI. – URL: <https://www.meltin.jp/en/technology/> (дата обращения: 17.02.2019).

22. Guardian™ GT // Sarcos Robotics. – URL: <https://www.sarcos.com/products/guardian-gt/> (дата обращения: 17.02.2019).

23. MIT HERMES Project // MIT Biomimetics Robotics Lab logo. – URL: <https://biomimetics.mit.edu/research/mit-hermes-project> (дата обращения: 17.02.2019).

24. Robotic systems KUKA // KUKA AG. – URL: <https://www.kuka.com/en-gb/industries/energy/nuclear-decommissioning> (дата обращения: 18.02.2019).

25. Исполнительный модуль манипулятора [Текст]: пат. 135958 Рос. Федерация: МПК В25J 17/00 / Кутлубаев И. М., Жиденко И. Г., Кияткин Д. В., Пермяков А. Ф., Сычков В. Б. ; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение «Андроидная техника» (ОАО «НПО "Андроидная техника») (RU). – № 2013113799/02; заявл. 27.03.2013; опубл. 27.12.2013, Бюл. № 36.

26. Антропоморфный манипулятор [Текст]: пат. 146552 Рос. Федерация: МПК В25J 3/00 / Богданов А.А., Кутлубаев И.М., Пермяков А.Ф., Сычков В.Б.; заявитель и патентообладатель Пермяков Александр Фаритович

(RU). – № 2014104218/02; заявл. 06.02.2014; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28.

27. Инструкция по эксплуатации на антропоморфный робот AR-601. – М.: ПАО НПО «Андроидная техника», 2013. –111 с.

28. Робот Федор-В // Проекты // НПО Андроидная техника. – URL: <https://npo-at.com/projects#projects-2018> (дата обращения: 06.07.2019).

29. Yu, W. PID admittance control for an upper limb exoskeleton / W. Yu, J. Rosen, X. Li // PID admittance control for an upper limb exoskeleton. – 2011. – P.1124-1129.

30. Kainz, H. Joint kinematic calculation based on clinical direct kinematic versus inverse kinematic gait models / H. Kainz, L. Modenese, D.G. Lloyd, S. Maine, H.P.J. Walsh // Journal of Biomechanics. – 2016. – № 49(9). – P.1658-1669.

31. Cempini, M. Self-alignment mechanisms for assistive wearable robots: A kinetostatic compatibility method / M. Cempini, S.M.M. De Rossi, T. Lenzi, N. Vitiello, M.C. Carrozza // IEEE Transactions on Robotics. – 2013. – №29(1). – P. 236-250.

32. Хурс, С.П. Состояние и тенденции развития антропоморфной робототехники. Машины и Установки: проектирование, разработка и эксплуатация / С.П. Хурс, А.А. Вережкин // МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2016. – № 04. – С. 25-52.

33. Cela, A.F. Complete low-cost implementation of a teleoperated control system for a humanoid robot / A.F. Cela, Y.J. Javier // Sensors (Switzerland). – 2013. – vol. 13. – issue 2. – P. 1385-1401.

34. Kanoun, O. Kinematic control of redundant manipulators: Generalizing the task-priority framework to inequality task / O. Kanoun, F. Lamiriaux, P.-B. Wieber // IEEE Transactions on Robotics. – 2011. – № 27 (4). – P. 785-792.

35. Liu, H. A common wireless remote-control system for mobile robots in laboratory / H. Liu, N. Stoll // IEEE I2MTC – International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings. – Graz, Austria, 2012. – P. 688-693.

36. УКС РТС // Проекты // НПО Андроидная техника URL: <https://npo->

at.com/projects#projects-2018 (дата обращения: 13.07.2019).

37. Жиденко, И.Г. Обоснование выбора структурной схемы роботов космического исполнения / И.Г. Жиденко, И.М. Кутлубаев, А.А. Богданов, В.Б. Сычков // Решетневские чтения: материалы XVII Международной научной конференции, посвященной памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (12-14 нояб. 2013 г., Красноярск): в 2 ч. /под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2013. – Ч. 1. – 522 с.

38. Abu-Dakka, F.J. Evolutionary indirect approach to solving trajectory planning problem for industrial robots operating in workspaces with obstacles / F.J. Abu-Dakka, F. Rubio, F. Valero, V. Mata // European Journal of Mechanics. – 2013. – № 42. – P. 210-218.

39. Kelaiaia, R. Multiobjective optimization of parallel kinematic mechanisms by the genetic algorithms / R. Kelaiaia, O. Company, A. Zaatri // Robotica. – 2012. – № 30(5). – P. 783-797.

40. Воронкин, Д.С. Решение прямой задачи кинематики для шестизвенного шарнирного робота-манипулятора / Д.С. Воронкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – по. 9. – pp. 236-241.

41. Гукасян, А.А. О кинематике и управлении движений упругих манипуляторов // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. – Казань. – Изд.: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2015. – С. 1098-1100.

42. Altuzarra, O. A symmetric parallel Schönflies–motion manipulator for pick-and-place operations / O. Altuzarra, B. Şandru, C. Pinto, V. Petuya // Robotica. – 2011. – № 29(6). – P. 853-862.

43. He, C. Kinematics analysis of the coupled tendon–driven robot based on the product-of-exponentials formula / C. He, S. Wang, Y. Xing, X. Wang // Mechanism and Machine Theory. – 2013. – № 60. – P. 90-111.

44. Ivan, V. Topology-based representations for motion planning and generalization in dynamic environments with interactions / V. Ivan, D. Zarubin, M.

Toussaint, T. Komura // *International Journal of Robotics Research*. – 2013. – № 32(9-10). – P. 1151-1163.

45. Jaillet, L. Path planning under kinematic constraints by rapidly exploring manifolds / Jaillet L., Porta J. M. // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2013. – № 29(1). – P. 105-117.

46. Zhang, D. Kinematic analysis of a novel 3–DOF actuation redundant parallel manipulator using artificial intelligence approach / D. Zhang, J. Lei // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2011. – № 27(1). – P. 157-163.

47. Zarkandi, S. PRRRRRP redundant planar parallel manipulator: Kinematics, workspace and singularity analysis / S. Zarkandi, A. Vafadar, M.R. Esmaili // *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, RAM* – 2011. – P. 61-66.

48. Pons-Moll, G. Outdoor human motion capture using inverse kinematics and von mises–fisher sampling / G. Pons-Moll, A. Baak, J. Gall, L. Leal-Taixé, et al // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. – Barcelona, Spain, 2011. – P. 1243-1250.

49. Köker, R. A neural-network committee machine approach to the inverse kinematics problem solution of robotic manipulators / R. Köker, T. Çakar, Y. Sari // *Engineering with Computers*. – 2013. – №30 (4). – P. 641-649.

50. Дыда, А.А. Решение обратной задачи кинематики для манипуляционного робота методом штрафных функций / А.А. Дыда, Д.А. Оськин // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 11-4. – С. 673-677.

51. Каргинов, Л.А. Иерархический подход к решению обратной задачи кинематики / Л.А. Каргинов // *Наука и Образование*. – МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2016. – № 3. – С. 37-63.

52. Ковальчук, А.К. Кинематика и динамика древовидного исполнительного механизма робота-краба / А.К. Ковальчук, В.В. Яроц // *Современные тенденции развития науки и технологий*. – 2015. – №7(3). – С. 84-89.

53. Пащенко, В.Н. Решение прямой задачи кинематики для

трехстепенного манипулятора параллельной структуры на базе кривошипно-шатунного механизма / В.Н. Пащенко, А.В. Романов, А.В. Артемьев, С.Ю Орехов // Наука и образование: Научное издание МГТУ Им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 11. – С. 136-152.

54. Aristidou, A. FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem / A. Aristidou, J. Lasenby // Graphical Models. – 2011. – №73 (5). – P. 243-260.

55. Bałchanowski, J. Topology and analysis of the singularities of a parallel mechanism with three degrees of freedom / J. Bałchanowski // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2014. – № 14(1). – P. 80-87.

56. Bócsi, B. Learning inverse kinematics with structured prediction / B. Bócsi, D. Nguyen-Tuong, L. Csató, B. Schölkopf, J. Peters // IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. – San Francisco, CA, USA, 2011. – P. 698-703.

57. Cocuzza, S. Least-squares-based reaction control of space manipulators / S. Cocuzza, I. Pretto, S. Debei // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 2012. – № 35(3). – P. 976-986.

58. DeMers, D. Inverse Kinematics of Dextrous Manipulators / D. DeMers, Kreutz-Delgado K. // Neural Systems for Robotics. – 1997. – Vol.1 – P.75-116.

59. Duguleana, M. Obstacle avoidance of redundant manipulators using neural networks based reinforcement learning / M. Duguleana, F.G. Barbuceanu, A. Teirelbar, G. Mogan // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2012. – № 28(2). – P.132-146.

60. Escande, A. Hierarchical quadratic programming: Fast online humanoid-robot motion generation / A. Escande, N. Mansard, P.-B. Wieber // International Journal of Robotics Research. – 2014. – № 33 (7). – P. 1006-1028.

61. Kamali, K. A novel method for direct kinematics solution of fully parallel manipulators using basic regions theory / K. Kamali, A. Akbarzadeh // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. – 2011. – № 225(5). – P. 683-701.

62. Köker, R.A genetic algorithm approach to a neural-network-based inverse kinematics solution of robotic manipulators based on error minimization / R. Köker // *Information Sciences*. – 2013. – № 222. – P. 528-543.
63. Köker, R.A neuro-simulated annealing approach to the inverse kinematics solution of redundant robotic manipulators / R. Köker // *Engineering with Computers*. – 2013. – № 29 (4). – P. 507-515.
64. Kuo, C. Kinematics of a Fully-Decoupled Remote Center-of-Motion Parallel Manipulator for Minimally Invasive Surgery / C. Kuo, J.S. Dai // *Journal of Medical Devices, Transactions of the ASME*. – 2012. – Vol. 6(2). – P. 1-12.
65. Li, Y. Inverse dynamics of a 3-PRC parallel kinematic machine / Y. Li, S. Staicu // *Nonlinear Dynamics*. – 2012. – № 67(2). – P.1031-1041.
66. Mahl, T. A variable curvature continuum kinematics for kinematic control of the bionic handling assistant / T. Mahl, A. Hildebrandt, O. Sawodny // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2014. – P. 935-949.
67. Marchese A.D., Katzschnann, R.K., Rus, D. Whole arm planning for a soft and highly compliant 2D robotic manipulator // *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2014. – №8. – C. 554–560.
68. Marcos, M.D.G. A multi-objective approach for the motion planning of redundant manipulators / M.D.G Marcos, J.A. TenreiroMacHado, T.-P. Azevedo-Perdicoúlis // *Applied Soft Computing Journal*. – 2012. – № 12(2). – P. 589-599.
69. Menini, L. A lie symmetry approach for the solution of the inverse kinematics problem / L. Menini, A. Tornambè // *Nonlinear Dynamics*. – 2012. – №69 (4). – P.1965-1977.
70. Staicu, S. Dynamics of the 6-6 Stewart parallel manipulator / S. Staicu // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2011. – № 27 (1). – P. 212-220.
71. Flacco, F. Motion control of redundant robots under joint constraints: Saturation in the null space / F. Flacco, A. De Luca, O. Khatib // *Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation*. – Saint Paul, MN, USA, 2012. – P. 285-292.
72. Копирующий манипулятор: пат. 135956 Рос. Федерация: МПК В25J

3/00 / Богданов А. А., Жиденко И. Г., Кутлубаев И. М., Кияткин Д. В., Пермяков А.Ф.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение «Андроидная техника» (ОАО «НПО «Андроидная техника») (RU). – № 2013122162/02; заявл. 14.05.2013; опубли. 27.12.2013, Бюл. № 36.

73. Kutlubaev, I. M. Basic concepts of power anthropomorphic grippers construction and calculation / I. M. Kutlubaev, I. G. Zhydenko, A. A. Bogdanov // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (Chelyabinsk, 19-20 May 2016). – Chelyabinsk, 2016. – P. 1-4. – doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7910963.

74. Фу, К. Робототехника. / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли. – М.: Мир, 1989. – 621 с.

75. Petrenko, V.I. Calculating rotation angles of the operator's arms based on generalized coordinates of the master device with following anthropomorphic manipulator in real time / V.I. Petrenko, F.B. Tebueva, V.B. Sychkov, M.M. Gurchinsky, V.O. Antonov // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). – 2018. – vol. 9. – № 7. – P. 447-461.

76. Tebueva, F. B. The method for determining the relative positions of the operator's arm for master-slave teleoperation of anthropomorphic manipulator / F. B. Tebueva, V. I. Petrenko, V. O. Antonov, M. M. Gurchinsky // International Review of Mechanical Engineering (IREME). – 2018. – vol. 12. – № 8. – P. 694-704. – doi: 10.15866/ireme.v12i8.15397.

77. Tebueva, F.B. Determination of the spatial position and orientation of the links of the robot anthropomorphic grip by the solution of the direct and inverse kinematics problem / F.B. Tebueva, V.I. Petrenko, A.S. Pavlov, S.S. Ryabtsev, V.O. Antonov // Multidisciplinary Symposium on ICT Research in Russian Federation and Europe "Integrating Research Agendas and Devising Joint Challenges" (Stavropol-Dombay, 15-20 October 2018). – URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2254/10000094.pdf>. (дата обращения 11.05.2019).

78. Петренко, В.И. Разработка алгоритма построения

пространственного положения суставов руки оператора на основе решения обратной задачи кинематики / В.И. Петренко, Ф.Б. Тебуева, В.О. Антонов, и др. // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства: материалы XIII Международной научно-технической конференции. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2018. – С.733–740.

79. Петренко, В.И. Математическая модель поиска оптимальных углов Эйлера для двигателей трехзвенного манипулятора / В.И. Петренко, Ф.Б. Тебуева, В.О. Антонов и др. // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Естественные и технические науки. – 2018. – №3. – С. 67-74.

80. Simon, L. Altmann rotations, quaternions, and double groups. / L. Simon. – Mineola: Dover Publications, 1986. – 317 p.

81. Антонов, В.О. Разработка математических методов и алгоритмов для планирования энергоэффективного пути перемещения манипулятора антропоморфного робота при наличии типичного препятствия: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Антонов Владимир Олегович. – Ставрополь, 2018. – 269 с.

82. Тебуева, Ф.Б. Общая схема системы поддержки принятия решений для оптимизации управления поведением мобильных манипуляционных роботов / Ф.Б. Тебуева, М.Г. Огур, В.Б. Сычков // Современная наука и инновации. – 2016. – № 1 (13). – С. 22-29.

83. Петренко, В.И. Определение зависимости обобщенных координат механизма задающего устройства с избыточной подвижностью / В.И. Петренко, Ф.Б. Тебуева, В.Б. Сычков, В.О. Антонов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2019. – Т 46 – №1.– С. 79-89.

84. Сычков, В.Б. Разработка критериев оценки эффективности копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 3. – С. 203-225.

85. Тебуева, Ф.Б. Оценка точности выполнения целевых операций при копирующем управлении манипуляторами антропоморфного робота / Ф.Б. Тебуева, В.И. Петренко, В.Б. Сычков, М.М. Гурчинский // Перспективы науки.

– 2019. – № 9(120). – С. 93-102.

86. Sychkov, V.B. Special robotics for cosmonauts support on the international space station and perspective orbital stations applying / V.B. Sychkov, A.A. Bogdanov, O.A. Saprykin, A.V. Grebenshikov // Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC 67, Making Space Accessible and Affordable to All Countries. Сер. «IAC 2016 - 67th International Astronautical Congress: Making Space Accessible and Affordable to All Countries». – Paris, France, 2016. – P. 3625-3629.

87. Sokhin, I. Application of virtual reality technologies for ergonomic studies of interaction between cosmonauts and humanoid robotic assistant / I. Sokhin, Y. Lonchakov, V. Sivolap, V.B. Sychkov, et al // Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC 67, Making Space Accessible and Affordable to All Countries. Сер. «IAC 2016 - 67th International Astronautical Congress: Making Space Accessible and Affordable to All Countries ». – Paris, France, 2016. – P. 3631-3634.

88. Богданов, А.А. Перспективы создания антропоморфных робототехнических систем для работы в космосе / А.А. Богданов, И.М. Кутлубаев, В.Б. Сычков // Пилотируемые полеты в космос. – 2012. – № 1 (3). – С. 78-84.

89. Богданов, А.А. Создание и исследование робототехнической системы с интерактивным управлением / А.А. Богданов, И.М. Кутлубаев, В.Б. Сычков [и др.] // Решетневские чтения. – 2012. – Т.1. – № 16. – С. 230-231.

90. Богданов, А.А. Комбинированные системы управления робототехническими комплексами на основе элементов сенсорики с обратными связями для обеспечения возможности замены человека при работе в условиях чрезвычайной ситуации / А.А. Богданов, И.М. Кутлубаев, В.Б. Сычков [и др.] // Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий: Тезисы докладов XX Международной научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. – М.: Изд-во ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015. – С. 279-

281.

91. Богданов, А.А. Разработка антропоморфного робота с интерактивным управлением / А.А. Богданов, И.М. Кутлубаев, В.Б. Сычков и др. // Необратимые процессы в природе и технике: материалы Восьмой Всероссийской конференции. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – С. 228-229.

92. Богданов, А.А. Основы построения специальных роботов для работы на космических аппаратах / А.А. Богданов, И.М. Кутлубаев, В.Б. Сычков и др. // Робототехника и искусственный интеллект: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2016. – С. 48-53.

93. Сычков, В.Б. Анализ подходов к выбору оптимальной структуры и параметрическому синтезу характеристик антропоморфных робототехнических систем / В.Б. Сычков // Студенческая наука для развития информационного общества: материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2016. – С. 231-233.

94. Сохин, И.Г. Эргономическое исследование дистанционного взаимодействия космонавтов с антропоморфными роботами-помощниками / И.Г. Сохин, М.В. Михайлюк, В.Б. Сычков [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – № 3 (12). – С. 18-22.

95. Сохин, И.Г. Экспериментальные эргономические исследования дистанционного взаимодействия космонавтов с антропоморфными роботами-помощниками с использованием технологий виртуального окружения / И.Г. Сохин, Ю.В. Лончаков, В.Б. Сычков [и др.] // Экстремальная робототехника. – 2016. – Т.1. – № 1. – С. 415-422.

96. Тебуева, Ф.Б. Способ формирования стратегий адаптивного поведения антропоморфных робототехнических систем / Ф.Б. Тебуева, С.С. Рябцев, В.Б. Сычков // Электронные средства и системы управления. – 2016. – № 1-2. – С. 138-140.

97. Богданов, А.А. Антропоморфные роботы – составляющая научной

аппаратуры орбитальных станций / А.А. Богданов, И.М. Кутлубаев, А.Ф., В.Б. Сычков [и др.] // Под ред. В.А. Углева / Робототехника и искусственный интеллект: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Сибирский федеральный университет. – Красноярск, 2016. – С. 71-80.

98. Гребенщиков, А.В. Моделирование с помощью программно-аппаратного комплекса виртуальной реальности процессов выполнения типовых полётных операций на борту пилотируемого космического аппарата роботом андроидного типа в телеоператорном копирующем режиме управления с задающим устройством в виде экзоскелета / А.В. Гребенщиков, А.А. Богданов, В.Б. Сычков [и др.] // Системный анализ, управление и навигация: тезисы докладов XXI Международной научной конференции. – М: Изд-во МАИ, 2016. – С. 102-104.

99. Антонов, В.О. Алгоритм расчета оптимальной комплектации транспортного модуля антропоморфной робототехнической системы на примере AR-601 / В.О. Антонов, Ф.Б. Тебуева, В.Б. Сычков // Студенческая наука для развития информационного общества: материалы V Всероссийской научно-технической конференции, часть 1. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2016. – С. 561-563.

100. Тебуева, Ф.Б. Классификация и назначение робототехнических систем. Анализ систем управления мобильными манипуляционными роботами [Текст] / Ф. Б. Тебуева, М. Г. Огур, В. Б. Сычков – М., 2017. – 26 с. – Деп. в ВИНТИ Рос. акад. наук 10.02.2017, № 14-B2017.

101. Петренко, В.И. Математическая модель определения пространственного положения звеньев задающего устройства на основе решения прямой задачи кинематики / В.И. Петренко, Тебуева Ф.Б., Сычков В.Б и др.// Проблемы автоматизации. Региональное управление. Связь и автоматика (ПАРУСА-2017): материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2017. – С. 29-33.

102. Тебуева, Ф.Б. Разработка способа решения обратной задачи кинематики для определения пространственного положения суставов руки оператора / Ф.Б. Тебуева, В.И. Петренко, В.Б. Сычков // Приборостроение в XXI веке – 2017. Интеграция науки, образования и производства: сборник материалов XIII Международной научно-технической конференции. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2018. – С. 733-740.

103. Тебуева, Ф.Б. Планирование движения антропоморфного манипулятора при копирующем управлении / Ф.Б. Тебуева, В.И. Петренко, В.Б. Сычков и др. // Экстремальная робототехника: сборник тезисов 30-ой Международной научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во, 2019. – С. 156-157.

104. Свид. 2019613059 Российская Федерация. Свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ. Модуль передачи сигналов управления антропоморфного манипулятора / М.М. Гурчинский, А.С. Павлов, В.Б. Сычков, заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СКФУ (RU). // № 2019614468; заявл. 25.03.2019; опубл. 05.04.2019, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

105. Свид. 2019613016 Российская Федерация. Свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ. Модуль считывания значений с узлов экзоскелетного комплекса / М.М. Гурчинский, А.С. Павлов, С.С. Рябцев, В.Э. Нечволода, Ю.А. Шутова, В.Б. Сычков, заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СКФУ (RU). // №2019614293; заявл. 25.03.2019; опубл. 02.04.2019, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

106. Свид. 2019616974 Российская Федерация. Свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ. Имитационная 3D-модель взаимодействия антропоморфного манипулятора с объектами внешней среды / В.И. Петренко, Ф.Б. Тебуева, В.О. Антонов, М.Ю. Кабиняков, В.Б. Сычков, заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СКФУ (RU). // № 2019617956; заявл. 11.06.2019; опубл. 25.06.2019, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

107. Свид. 2019616879 Российская Федерация. Свидетельство

государственной регистрации программ для ЭВМ. Программный комплекс экзоскелетного комплекса / В.И. Петренко, Ф.Б. Тебуева, В.О. Антонов, В.Б. Сычков, М.Ю. Кабиняков, А.И. Бурьянов, заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СКФУ (RU). // №2019618130; заявл. 11.06.2019; опубл. 26.06.2019, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

108. Свид. 2019616940 Российская Федерация. Свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ. Программный комплекс системы управления антропоморфным манипулятором / В.И. Петренко, Ф.Б. Тебуева, В.О. Антонов, В.Б. Сычков, А.И. Бурьянов, заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СКФУ (RU). // № 2019618240; заявл. 11.06.2019; опубл. 27.06.2019, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

109. Тебуева, Ф.Б. Разработка программно-аппаратного комплекса системы управления на основе решения обратной задачи динамики и кинематики / Ф.Б. Тебуева, В.И. Петренко, В.В. Копытов, О.С. Мезенцева, П.В. Харечкин, В.В. Науменко, Ю.В. Кузьминов, В.О. Антонов, М.Г. Огур, Е.А. Некрасова, С.М. Петросян, С.С. Рябцев, А.В. Шевченко, Э.Ф. Бухарметова, А.С. Павлов, Ю.А. Шутова, М.М. Гурчинский., Н.Ю. Свистунов, И.В. Стручков, О.И. Трофимюк, Д.А. Щербаков, А.С. Безгуб, Н.С. Потявин, Е.А. Цурская, А.Ф. Пермяков, В.Б. Сычков // ФЦПР 2014-2020 (уникальный идентификатор RFMEFI57517X0166) при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Этап №1. Обоснование и выбор направления исследований. – 2017. – СКФУ. – Инв. № 2017.12. ПР.011-1. – 233 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Раскадровка анимации работы системы имитационного моделирования
экзоскелетного комплекса

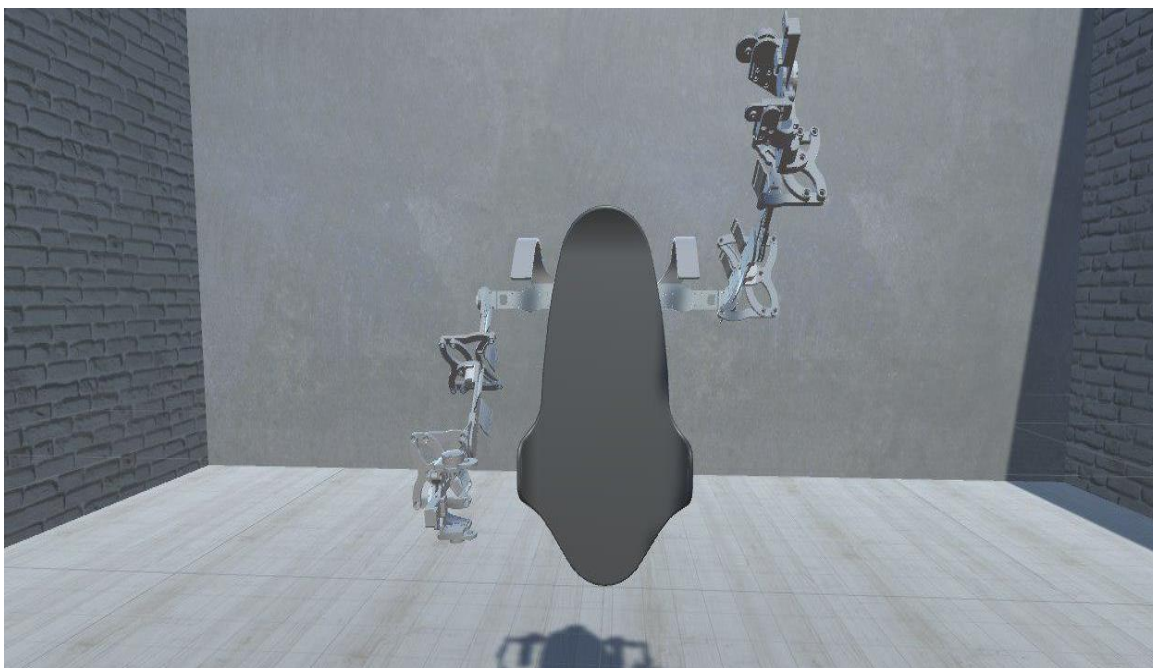


Рисунок А.1 – Имитационная модель перемещения в плечевом суставе

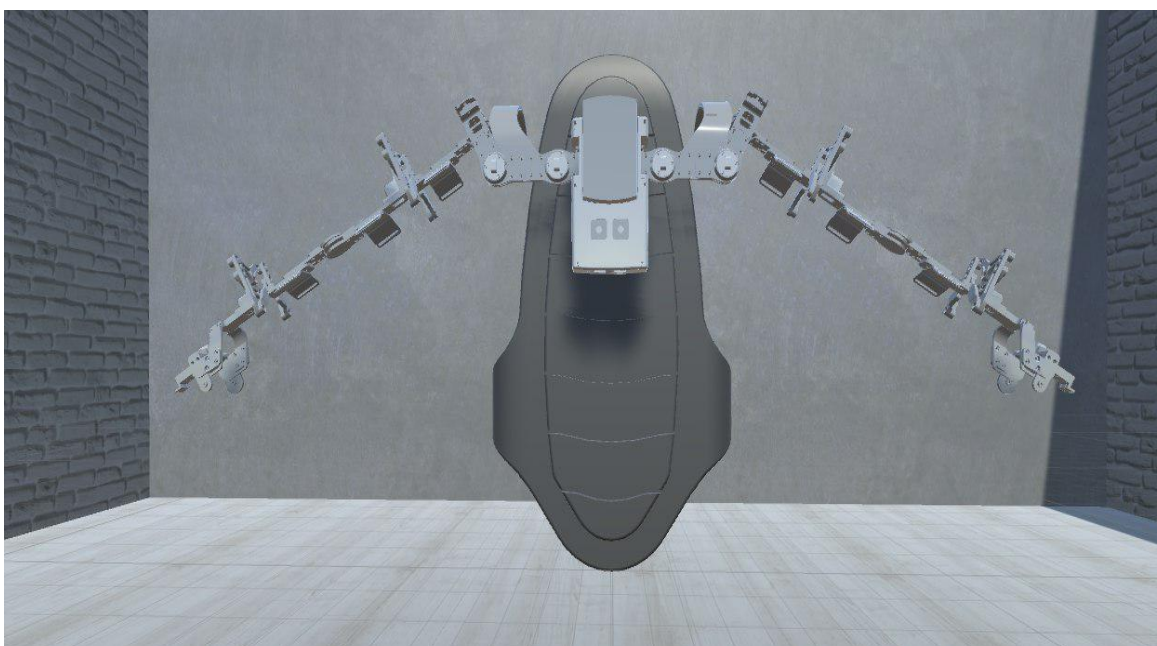


Рисунок А.2 – Имитационная модель подъема в плечевом суставе

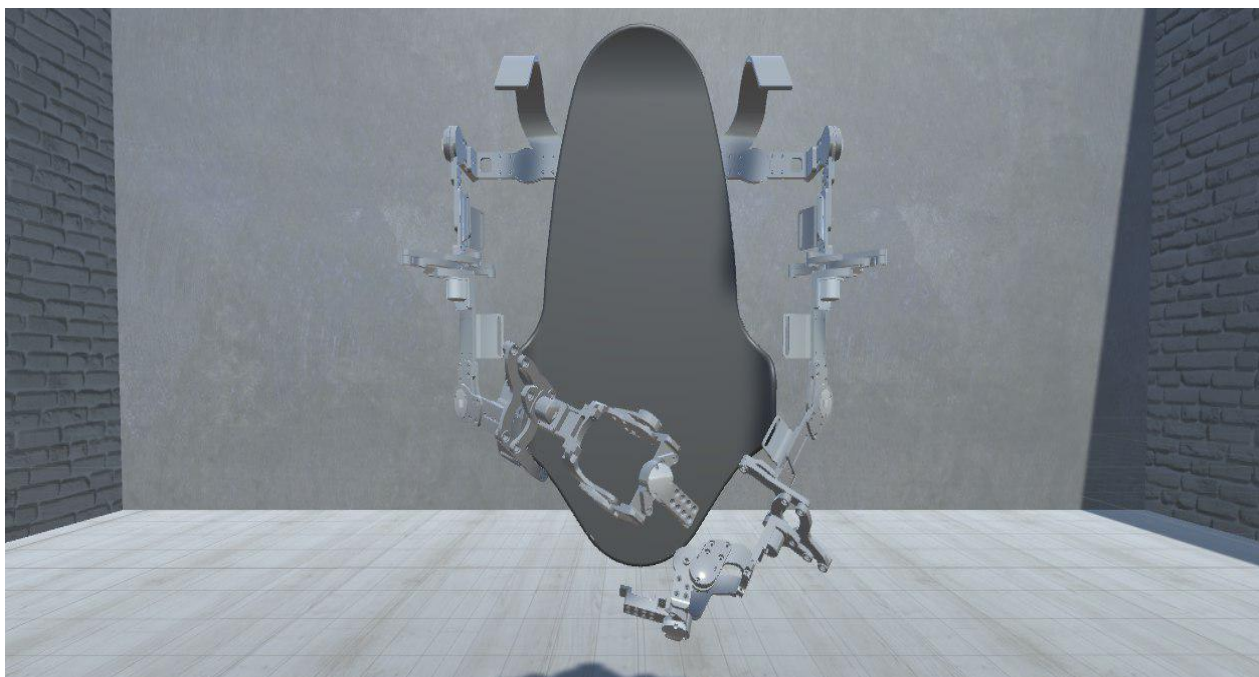


Рисунок А.3 – Имитационная модель ротации в локтевом суставе

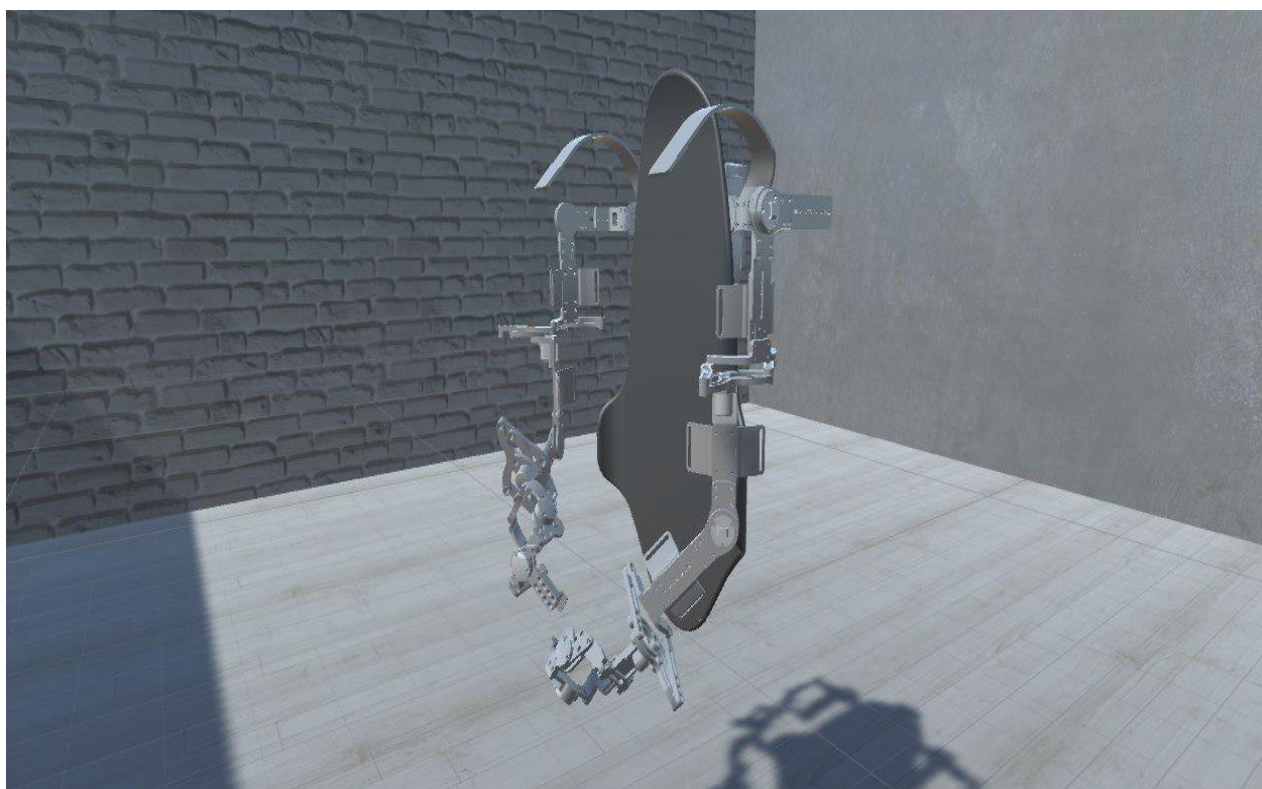


Рисунок А.4 – Имитационная модель вида сбоку

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Программный код пользовательского интерфейса имитационной программы

Файл program.h

```
#ifndef PROGRAM_H
#define PROGRAM_H
#include <QDialog>
#include <QUdpSocket>
#include <QLabel>
namespace Ui
{
class Program;
}
class Program: public QDialog
{
Q_OBJECT
public:
explicit Program (QWidget *parent = 0);
~ Program ();
private slots:
void processPendingDatagrams();
void loadConfig();
bool saveConfig();
void settings();
void exit();
void user();
void expert();
void sensors();
void buffer();
void voltage();
void record();
private:
QTextCodec *codec;
QUdpSocketudpSocket;
QLabel *arr;
Ui:: Program *ui;
};
#endif
```

Файл main.cpp

```
#include "program_h"
#include <QApplication>
#include <QtGui>
#include <QMenu>
#include <QMenuBar>
#include <QWidget>
#include <QTextEdit>
#include <QMainWindow>
int main(int argc, char *argv[])
{
QApplication a(argc, argv);
Program w;
QMenuBar menu;
```

```

QMenu* file = new QMenu("&File");
file->addAction(
"&Load Config",
&a,
SLOT(loadConfig())
);
file->addAction(
"&Save Config",
&a,
SLOT(saveConfig())
);
file->addAction(
"&Settings",
&a,
SLOT(settings())
);
file->addAction(
"&Exit",
&a,
SLOT(exit())
);
QMenu* interface = new QMenu("&Interface");
interface->addAction(
"&User",
&a,
SLOT(user())
);
interface->addAction(
"&Expert",
&a,
SLOT(expert())
);
QMenu* logs = new QMenu("&Logs");
logs->addAction(
"&Sensors",
&a,
SLOT(sensors())
);
logs->addAction(
"&Buffer",
&a,
SLOT(buffer())
);
logs->addAction(
"&Voltage",
&a,
SLOT(voltage())
);
logs->addAction(
"&Record",
&a,
SLOT(record())
);
menu.addMenu(file);
menu.addMenu(interface);
menu.addMenu(logs);
menu.show();
return a.exec();
}

```

```

Файл program.cpp
#include "program_h"
#include "ui_program_h"

```

```

#include <QDebug>
#include <QString>
#include <QtGui>
#include <QMainWindow>
#include <QWidget>
Program::~Program ()
{
delete ui;
}
Program::Program (QWidget *parent) :
QDialog(parent),
ui(new Ui::Program)
{
ui->setupUi(this);
udpSocket.bind(18666);
connect(
&udpSocket,
SIGNAL(readyRead()),
this,
SLOT(processPendingDatagrams())
);
}
void ConnectPr::processPendingDatagrams()
{
QByteArray datagram;
datagram.resize(udpSocket.pendingDatagramSize());
udpSocket.readDatagram(
datagram.data(),
datagram.size()
);
QDataStream in(&datagram, QIODevice::ReadOnly);
QStringer = "no result";
qint64 size = -1;
if(in.device()->size() >sizeof(qint64)){
in >> size;
QDebug() <<er;
}
else
QDebug() <<er;
return;
if(in.device()->size() - sizeof(qint64) < size)
QDebug() <<er;
return;
}
void MainWindow::open()
{
if (maybeSave()) {
QStringfileName =
QFileDialog::getOpenFileName(".", fileFilters, this);
if (!fileName.isEmpty())
loadFile(fileName);
}
}
void MainWindow::saveFile(const QString&fileName)
{
if (spreadsheet->writeFile(fileName)) {
setCurrentFile(fileName);
statusBar()->message(tr("File saved"), 2000);
} else {
statusBar()->message(tr("Saving canceled"), 2000);
}
}
void MainWindow::closeEvent(QCloseEvent *event)

```



```

{
if (maybeSave()) {
writeSettings();
event->accept();
} else {
event->ignore();
}
}
void MainWindow::setCurrentFile(const QString&fileName)
{
curFile = fileName;
modLabel->clear();
modified = false;
if (curFile.isEmpty()) {
setCaption(tr("Spreadsheet"));
} else {
setCaption(tr("%1 - %2").arg(strippedName(curFile))
.arg(tr("Spreadsheet")));
recentFiles.remove(curFile);
recentFiles.push_front(curFile);
updateRecentFileItems();
}
}
QStringMainWindow::strippedName(const QString&fullName)
{
return QFileInfo(fullName).fileName();
}
void MainWindow::updateRecentFileItems()
{
while ((int)recentFiles.size() >MaxRecentFiles)
recentFiles.pop_back();
for (int i = 0; i < (int)recentFiles.size(); ++i) {
QString text = tr("&%1 %2")
.arg(i + 1)
.arg(strippedName(recentFiles[i]));
if (recentFileIds[i] == -1) {
if (i == 0)
fileMenu->insertSeparator(fileMenu->count() - 2);
recentFileIds[i] =
fileMenu->insertItem(text, this,
SLOT(openRecentFile(int)),
0, -1,
fileMenu->count() - 2);
fileMenu->setItemParameter(recentFileIds[i], i);
} else {
fileMenu->changeItem(recentFileIds[i], text);
}
}
}
void MainWindow::openRecentFile(int param)
{
if (maybeSave())
loadFile(recentFiles[param]);
}
void MainWindow::createStatusBar()
{
locationLabel = new QLabel(" W999 ", this);
locationLabel->setAlignment(AlignHCenter);
locationLabel->setMinimumSize(locationLabel->sizeHint());
formulaLabel = new QLabel(this);
modLabel = new QLabel(tr(" MOD "), this);
modLabel->setAlignment(AlignHCenter);
modLabel->setMinimumSize(modLabel->sizeHint());
}

```

```

modLabel->clear();
statusBar()->addWidget(locationLabel);
statusBar()->addWidget(formulaLabel, 1);
statusBar()->addWidget(modLabel);
connect(spreadsheet, SIGNAL(currentChanged(int, int)),
this, SLOT(updateCellIndicators()));
connect(spreadsheet, SIGNAL(modified()),
this, SLOT(spreadsheetModified()));
updateCellIndicators();
}
void MainWindow::updateCellIndicators()
{
locationLabel->setText(spreadsheet->currentLocation());
formulaLabel->setText(" " + spreadsheet->currentFormula());
}
void MainWindow::spreadsheetModified()
{
modLabel->setText(tr("MOD"));
modified = true;
updateCellIndicators();
}
void MainWindow::writeSettings()
{
QSettings settings;
settings.setPath("software-inc.com", "Model");
settings.beginGroup("/Model");
settings.writeEntry("/geometry/x", x());
settings.writeEntry("/geometry/y", y());
settings.writeEntry("/geometry/width", width());
settings.writeEntry("/geometry/height", height());
settings.writeEntry("/recentFiles", recentFiles);
settings.writeEntry("/showGrid", showGridAct->isOn());
settings.writeEntry("/autoRecalc", showGridAct->isOn());
settings.endGroup();
}
void MainWindow::readSettings()
{
QSettings settings;
settings.setPath("software-inc.com", " Model");
settings.beginGroup("/Model");
int x = settings.readNumEntry("/geometry/x", 200);
int y = settings.readNumEntry("/geometry/y", 200);
int w = settings.readNumEntry("/geometry/width", 400);
int h = settings.readNumEntry("/geometry/height", 400);
move(x, y);
resize(w, h);
recentFiles = settings.readListEntry("/recentFiles");
updateRecentFileItems();
showGridAct->setOn(
settings.readBoolEntry("/showGrid", true));
autoRecalcAct->setOn(
settings.readBoolEntry("/autoRecalc", true));
settings.endGroup();
}

```

Листинг Д.2 – Программный код графического представления имитационной программы

```

Файлmodel_state.h:
#ifndef URDF_MODEL_STATE_H
#define URDF_MODEL_STATE_H
#include <string>
#include <vector>
#include <map>

```

```

#include "urdf_model/pose.h"
#include <urdf_model/twist.h>
#include "urdf_model_state/types.h"
namespace urdf{
#ifdef _MSC_VER
#if (_MSC_VER <= 1700)
double round(double value)
{
return (value >= 0.0f)?(floor(value + 0.5f)):(ceil(value - 0.5f));
}
#endif
#endif
class Time
{
public:
Time() { this->clear(); };
void set(double _seconds)
{
this->sec = (int32_t)(floor(_seconds));
this->nsec = (int32_t)(round((_seconds - this->sec) * 1e9));
this->Correct();
};
operator double ()
{
return (static_cast<double>(this->sec) +
static_cast<double>(this->nsec)*1e-9);
};
int32_t sec;
int32_t nsec;
void clear()
{
this->sec = 0;
this->nsec = 0;
};
private:
void Correct()
{
if (this->nsec >= 1e9)
{
this->sec++;
this->nsec = (int32_t)(this->nsec - 1e9);
}
else if (this->nsec < 0)
{
this->sec--;
this->nsec = (int32_t)(this->nsec + 1e9);
}
};
};
class JointState
{
public:
JointState() { this->clear(); };
std::string joint;
std::vector<double> position;
std::vector<double> velocity;
std::vector<double> effort;
void clear()
{
this->joint.clear();
this->position.clear();
this->velocity.clear();
this->effort.clear();
};
};

```

```

}
};
class ModelState
{
public:
ModelState() { this->clear(); };
std::string name;
Time time_stamp;
void clear()
{
this->name.clear();
this->time_stamp.set(0);
this->joint_states.clear();
};
std::vector<JointStateSharedPtr>joint_states;
};
}
#endif
Файлtwist.h:
#ifndef URDF_MODEL_STATE_TWIST_
#define URDF_MODEL_STATE_TWIST_
#warning "Please Use #include <urdf_model/twist.h>"
#include <urdf_model/twist.h>
#endif

Файлtypes.h:
#ifndef URDF_MODEL_STATE_TYPES_H
#define URDF_MODEL_STATE_TYPES_H
#include <memory>
namespace urdf{
class JointState;
typedef std::shared_ptr<JointState>JointStateSharedPtr;
}
#endif

Файлcolor.h
#ifndef URDF_INTERFACE_COLOR_H
#define URDF_INTERFACE_COLOR_H
#include <stdexcept>
#include <string>
#include <vector>
#include <math.h>
#include <urdf_model/utils.h>
namespace urdf
{
class Color
{
public:
Color() {this->clear();};
float r;
float g;
float b;
float a;
void clear()
{
r = g = b = 0.0f;
a = 1.0f;
}
bool init(const std::string &vector_str)
{
this->clear();
std::vector<std::string> pieces;
std::vector<float>rgba;

```

```

urdf::split_string( pieces, vector_str, " ");
for (unsigned int i = 0; i<pieces.size(); ++i)
{
if (!pieces[i].empty())
{
try
{
rgba.push_back(std::stof(pieces[i]));
}
catch (std::invalid_argument& /*e*/) {
return false;
}
catch (std::out_of_range& /*e*/) {
return false;
}
}
}
if (rgba.size() != 4)
{
return false;
}
this->r = rgba[0];
this->g = rgba[1];
this->b = rgba[2];
this->a = rgba[3];
return true;
};
};
}
#endif

```

```

Файл joint.h
#ifndef URDF_INTERFACE_JOINT_H
#define URDF_INTERFACE_JOINT_H
#include <string>
#include <vector>
#include "urdf_model/pose.h"
#include "urdf_model/types.h"
namespace urdf{
class Link;
class JointDynamics
{
public:
JointDynamics() { this->clear(); };
double damping;
double friction;
void clear()
{
damping = 0;
friction = 0;
};
};
class JointLimits
{
public:
JointLimits() { this->clear(); };
double lower;
double upper;
double effort;
double velocity;
void clear()
{
lower = 0;

```

```

upper = 0;
effort = 0;
velocity = 0;
};
};
class JointSafety
{
public:
JointSafety() { this->clear(); };
double soft_upper_limit;
double soft_lower_limit;
double k_position;
double k_velocity;
void clear()
{
soft_upper_limit = 0;
soft_lower_limit = 0;
k_position = 0;
k_velocity = 0;
};
};
class JointCalibration
{
public:
JointCalibration() { this->clear(); };
double reference_position;
DoubleSharedPtr rising, falling;
void clear()
{
reference_position = 0;
};
};
class JointMimic
{
public:
JointMimic() { this->clear(); };
double offset;
double multiplier;
std::string joint_name;
void clear()
{
offset = 0.0;
multiplier = 0.0;
joint_name.clear();
};
};
class Joint
{
public:
Joint() { this->clear(); };
std::string name;
enum
{
UNKNOWN, REVOLUTE, CONTINUOUS, PRISMATIC, FLOATING, PLANAR, FIXED
} type;
Vector3 axis;
std::string child_link_name;
std::string parent_link_name;
Pose parent_to_joint_origin_transform;
JointDynamicsSharedPtr dynamics;
JointLimitsSharedPtr limits;
JointSafetySharedPtr safety;
JointCalibrationSharedPtr calibration;
};
};

```

```

JointMimicSharedPtr mimic;
void clear()
{
this->axis.clear();
this->child_link_name.clear();
this->parent_link_name.clear();
this->parent_to_joint_origin_transform.clear();
this->dynamics.reset();
this->limits.reset();
this->safety.reset();
this->calibration.reset();
this->mimic.reset();
this->type = UNKNOWN;
};
};
}
#endif

```

Файл Link.h:

```

#ifndef URDF_INTERFACE_LINK_H
#define URDF_INTERFACE_LINK_H
#include <string>
#include <vector>
#include <map>
#include "joint.h"
#include "color.h"
#include "types.h"
namespace urdf{
class Geometry
{
public:
enum { SPHERE, BOX, CYLINDER, MESH } type;
virtual ~Geometry(void)
{
}
};
class Sphere : public Geometry
{
public:
Sphere() { this->clear(); type = SPHERE; };
double radius;

void clear()
{
radius = 0;
};
};
class Box : public Geometry
{
public:
Box() { this->clear(); type = BOX; };
Vector3 dim;
void clear()
{
this->dim.clear();
};
};
class Cylinder : public Geometry
{
public:
Cylinder() { this->clear(); type = CYLINDER; };
double length;
double radius;

```

```

void clear()
{
length = 0;
radius = 0;
};
};
class Mesh : public Geometry
{
public:
Mesh() { this->clear(); type = MESH; };
std::string filename;
Vector3 scale;
void clear()
{
filename.clear();
scale.x = 1;
scale.y = 1;
scale.z = 1;
};
};
class Material
{
public:
Material() { this->clear(); };
std::string name;
std::string texture_filename;
Color color;
void clear()
{
color.clear();
texture_filename.clear();
name.clear();
};
};
class Inertial
{
public:
Inertial() { this->clear(); };
Pose origin;
double mass;
double ixx,ixy,ixz,iyy,iyz,izz;
void clear()
{
origin.clear();
mass = 0;
ixx = ixy = ixz = iyy = iyz = izz = 0;
};
};
class Visual
{
public:
Visual() { this->clear(); };
Pose origin;
GeometrySharedPtr geometry;
std::string material_name;
MaterialSharedPtr material;
void clear()
{
origin.clear();
material_name.clear();
material.reset();
geometry.reset();
name.clear();
};
};

```



```

};
std::string name;
};
class Collision
{
public:
Collision() { this->clear(); };
Pose origin;
GeometrySharedPtr geometry;
void clear()
{
origin.clear();
geometry.reset();
name.clear();
};
std::string name;
};
class Link
{
public:
Link() { this->clear(); };
std::string name;
InertialSharedPtr inertial;
VisualSharedPtr visual;
CollisionSharedPtr collision;
std::vector<CollisionSharedPtr>collision_array;
std::vector<VisualSharedPtr>visual_array;
JointSharedPtrparent_joint;
std::vector<JointSharedPtr>child_joints;
std::vector<LinkSharedPtr>child_links;
LinkSharedPtrgetParent() const
{return parent_link_.lock();};
void setParent(const LinkSharedPtr&parent)
{ parent_link_ = parent; }
void clear()
{
this->name.clear();
this->inertial.reset();
this->visual.reset();
this->collision.reset();
this->parent_joint.reset();
this->child_joints.clear();
this->child_links.clear();
this->collision_array.clear();
this->visual_array.clear();
};
private:
LinkWeakPtrparent_link_;
};
}
#endif

```

ФайлModel.h:

```

#ifndef URDF_INTERFACE_MODEL_H
#define URDF_INTERFACE_MODEL_H
#include <string>
#include <map>
#include <urdf_model/link.h>
#include <urdf_model/types.h>
#include <urdf_exception/exception.h>
namespace urdf {
class ModelInterface
{

```

```

public:
LinkConstSharedPtrgetRoot(void) const{return this->root_link_};
LinkConstSharedPtrgetLink(const std::string& name) const
{
LinkConstSharedPtrptr;
if (this->links_.find(name) == this->links_.end())
ptr.reset();
else
ptr = this->links_.find(name)->second;
return ptr;
};
JointConstSharedPtrgetJoint(const std::string& name) const
{
JointConstSharedPtrptr;
if (this->joints_.find(name) == this->joints_.end())
ptr.reset();
else
ptr = this->joints_.find(name)->second;
return ptr;
};
const std::string&getName() const {return name_};
void getLinks(std::vector<LinkSharedPtr>& links) const
{
for (std::map<std::string,LinkSharedPtr>::const_iterator link = this->links_.begin();link != this->links_.end(); link++)
{
links.push_back(link->second);
}
};
void clear()
{
name_.clear();
this->links_.clear();
this->joints_.clear();
this->materials_.clear();
this->root_link_.reset();
};
void getLink(const std::string& name, LinkSharedPtr&link) const
{
LinkSharedPtrptr;
if (this->links_.find(name) == this->links_.end())
ptr.reset();
else
ptr = this->links_.find(name)->second;
link = ptr;
};
MaterialSharedPtrgetMaterial(const std::string& name) const
{
MaterialSharedPtrptr;
if (this->materials_.find(name) == this->materials_.end())
ptr.reset();
else
ptr = this->materials_.find(name)->second;
return ptr;
};
void initTree(std::map<std::string, std::string>&parent_link_tree)
{
for (std::map<std::string, JointSharedPtr>::iterator joint = this->joints_.begin();joint != this->joints_.end(); joint++)
{
std::string parent_link_name = joint->second->parent_link_name;
std::string child_link_name = joint->second->child_link_name;
if (parent_link_name.empty() || child_link_name.empty())
{
throw ParseError("Joint [" + joint->second->name + "] is missing a parent and/or child link specification.");
}
}
}

```

```

}
else
{
LinkSharedPtrchild_link, parent_link;
this->getLink(child_link_name, child_link);
if (!child_link)
{
throw ParseError("child link [" + child_link_name + "] of joint [" + joint->first + "] not found");
}
this->getLink(parent_link_name, parent_link);
if (!parent_link)
{
throw ParseError("parent link [" + parent_link_name + "] of joint [" + joint->first + "] not found. This is not valid
according to the URDF spec. Every link you refer to from a joint needs to be explicitly defined in the robot description.
To fix this problem you can either remove this joint [" + joint->first + "] from your urdf file, or add '<link name=\"" +
parent_link_name + "\" />' to your urdf file.");
}
child_link->setParent(parent_link);
child_link->parent_joint = joint->second;
parent_link->child_joints.push_back(joint->second);
parent_link->child_links.push_back(child_link);
parent_link_tree[child_link->name] = parent_link_name;
}
}
}
void initRoot(const std::map<std::string, std::string>&parent_link_tree)
{
this->root_link_.reset();
for (std::map<std::string, LinkSharedPtr>::const_iterator l=this->links_.begin(); l!=this->links_.end(); l++)
{
std::map<std::string, std::string>::const_iterator parent = parent_link_tree.find(l->first);
if (parent == parent_link_tree.end())
{
if (!this->root_link_)
{
getLink(l->first, this->root_link_);
}
else
{
throw ParseError("Two root links found: [" + this->root_link_->name + "] and [" + l->first + "]");
}
}
if (!this->root_link_)
{
throw ParseError("No root link found. The robot xml is not a valid tree.");
}
}
std::map<std::string, LinkSharedPtr> links_;
std::map<std::string, JointSharedPtr> joints_;
std::map<std::string, MaterialSharedPtr> materials_;
std::string name_;
LinkSharedPtrroot_link_;
};
}
#endif

```

Файлpose.h:

```

#ifndef URDF_INTERFACE_POSE_H
#define URDF_INTERFACE_POSE_H
#include <cmath>
#include <sstream>
#include <stdexcept>

```

```

#include <string>
#include <vector>
#include <urdf_exception/exception.h>
#include <urdf_model/utils.h>
namespace urdf{
class Vector3
{
public:
Vector3(double _x,double _y, double _z) {this->x=_x;this->y=_y;this->z=_z;};
Vector3() {this->clear();};
double x;
double y;
double z;
void clear() {this->x=this->y=this->z=0.0;};
void init(const std::string &vector_str)
{
this->clear();
std::vector<std::string> pieces;
std::vector<double>xyz;
urdf::split_string( pieces, vector_str, " ");
for (unsigned int i = 0; i<pieces.size(); ++i){
if (pieces[i] != ""){
try {
xyz.push_back(strToDouble(pieces[i].c_str()));
} catch(std::runtime_error&) {
throw ParseError("Unable to parse component [" + pieces[i] + "] to a double (while parsing a vector value)");
}
}
}
if (xyz.size() != 3)
throw ParseError("Parser found " + std::to_string(xyz.size()) + " elements but 3 expected while parsing vector [" +
vector_str + "]");
this->x = xyz[0];
this->y = xyz[1];
this->z = xyz[2];
}
Vector3 operator+(Vector3 vec)
{
return Vector3(this->x+vec.x,this->y+vec.y,this->z+vec.z);
};
};
class Rotation
{
public:
Rotation(double _x,double _y, double _z, double _w) {this->x=_x;this->y=_y;this->z=_z;this->w=_w;};
Rotation() {this->clear();};
void getQuaternion(double &quat_x,double&quat_y,double&quat_z, double &quat_w) const
{
quat_x = this->x;
quat_y = this->y;
quat_z = this->z;
quat_w = this->w;
};
void getRPY(double &roll,double&pitch,double&yaw) const
{
double sqw;
double sqx;
double sqy;
double sqz;
sqx = this->x * this->x;
sqy = this->y * this->y;
sqz = this->z * this->z;
sqw = this->w * this->w;
};
};
};

```

```

double sarg = -2 * (this->x*this->z - this->w*this->y);
const double pi_2 = 1.57079632679489661923;
if (sarg<= -0.99999) {
pitch = -pi_2;
roll = 0;
yaw = 2 * atan2(this->x, -this->y);
} else if (sarg>= 0.99999) {
pitch = pi_2;
roll = 0;
yaw = 2 * atan2(-this->x, this->y);
} else {
pitch = asin(sarg);
roll = atan2(2 * (this->y*this->z + this->w*this->x), sqw - sqx - sqy + sqz);
yaw = atan2(2 * (this->x*this->y + this->w*this->z), sqw + sqx - sqy - sqz);
}
};
void setFromQuaternion(double quat_x,doublequat_y,doublequat_z,doublequat_w)
{
this->x = quat_x;
this->y = quat_y;
this->z = quat_z;
this->w = quat_w;
this->normalize();
};
void setFromRPY(double roll, double pitch, double yaw)
{
double phi, the, psi;
phi = roll / 2.0;
the = pitch / 2.0;
psi = yaw / 2.0;
this->x = sin(phi) * cos(the) * cos(psi) - cos(phi) * sin(the) * sin(psi);
this->y = cos(phi) * sin(the) * cos(psi) + sin(phi) * cos(the) * sin(psi);
this->z = cos(phi) * cos(the) * sin(psi) - sin(phi) * sin(the) * cos(psi);
this->w = cos(phi) * cos(the) * cos(psi) + sin(phi) * sin(the) * sin(psi);
this->normalize();
};
double x,y,z,w;
void init(const std::string &rotation_str)
{
this->clear();
Vector3 rpy;
rpy.init(rotation_str);
setFromRPY(rpy.x, rpy.y, rpy.z);
}
void clear() { this->x=this->y=this->z=0.0;this->w=1.0; }
void normalize()
{
double s = sqrt(this->x * this->x +
this->y * this->y +
this->z * this->z +
this->w * this->w);
if (s == 0.0)
{
this->x = 0.0;
this->y = 0.0;
this->z = 0.0;
this->w = 1.0;
}
else
{
this->x /= s;
this->y /= s;
this->z /= s;
}
}

```

```

this->w /= s;
}
};
Rotation operator*( const Rotation &qt ) const
{
Rotation c;
c.x = this->w * qt.x + this->x * qt.w + this->y * qt.z - this->z * qt.y;
c.y = this->w * qt.y - this->x * qt.z + this->y * qt.w + this->z * qt.x;
c.z = this->w * qt.z + this->x * qt.y - this->y * qt.x + this->z * qt.w;
c.w = this->w * qt.w - this->x * qt.x - this->y * qt.y - this->z * qt.z;
return c;
};
Vector3 operator*(Vector3 vec) const
{
Rotation tmp;
Vector3 result;
tmp.w = 0.0;
tmp.x = vec.x;
tmp.y = vec.y;
tmp.z = vec.z;
tmp = (*this) * (tmp * this->GetInverse());
result.x = tmp.x;
result.y = tmp.y;
result.z = tmp.z;
return result;
};
Rotation GetInverse() const
{
Rotation q;
double norm = this->w*this->w+this->x*this->x+this->y*this->y+this->z*this->z;
if (norm > 0.0)
{
q.w = this->w / norm;
q.x = -this->x / norm;
q.y = -this->y / norm;
q.z = -this->z / norm;
}
return q;
};
};
class Pose
{
public:
Pose() { this->clear(); };
Vector3 position;
Rotation rotation;
void clear()
{
this->position.clear();
this->rotation.clear();
};
};
}
#endif

```

Файлtwist.h:

```

#ifndef URDF_TWIST_H
#define URDF_TWIST_H
#include <string>
#include <sstream>
#include <vector>
#include <math.h>
#include <urdf_model/pose.h>

```

```

namespace urdf{
class Twist
{
public:
Twist() { this->clear(); };
Vector3 linear;
Vector3 angular;
void clear()
{
this->linear.clear();
this->angular.clear();
};
};
}
#endif

```

```

ФайлUtils.h:
#ifndef URDF_INTERFACE_UTILS_H
#define URDF_INTERFACE_UTILS_H
#include <locale>
#include <sstream>
#include <stdexcept>
#include <string>
#include <vector>
namespace urdf {
void split_string(std::vector<std::string>&result,
const std::string &input,
const std::string &isAnyOf)
{
std::string::size_type start = 0;
std::string::size_type end = input.find_first_of(isAnyOf, start);
while (end != std::string::npos)
{
result.push_back(input.substr(start, end-start));
start = end + 1;
end = input.find_first_of(isAnyOf, start);
}
if (start <input.length())
{
result.push_back(input.substr(start));
}
}
static inline double strToDouble(const char *in)
{
std::stringstream ss;
ss.imbue(std::locale::classic());
ss << in;
double out;
ss >> out;
if (ss.fail() || !ss.eof()) {
throw std::runtime_error("Failed converting string to double");
}
return out;
}
}
#endif

```