

Разработка структуры экзоскелета верхних конечностей для регистрации движений оператора при копирующем управлении

В.И. Петренко

Кафедра организации и технологии защиты информации
Северо-Кавказский федеральный университет
Россия, Ставрополь,
e-mail: vip.petrenko@gmail.com

М.М. Гурчинский

Кафедра прикладной математики и компьютерной безопасности
Северо-Кавказский федеральный университет
Россия, Ставрополь
e-mail: gurcmikhail@yandex.ru

Ф.Б. Тебуева

Кафедра прикладной математики и компьютерной безопасности
Северо-Кавказский федеральный университет
Россия, Ставрополь
e-mail: fariza.teb@gmail.com

С.С. Рябцев

Кафедра прикладной математики и компьютерной безопасности
Северо-Кавказский федеральный университет
Россия, Ставрополь
e-mail: nalfartorn@yandex.ru

Аннотация

Исследование посвящено разработке структуры экзоскелета верхних конечностей для регистрации движений оператора при копирующем управлении. Задачей исследования является разработка конструкторских решений в области регистрации текущих положений частей руки оператора при выполнении технологических операций формирования управляющих команд для точного их воспроизведения движениями звеньев антропоморфного манипулятора в реальном масштабе времени. Для разработанной структуры экзоскелета верхних конечностей описана схема деления изделия, приведено обоснование конструкции, схемы расположения кинематических пар, оснащенных датчиками угловых поворотов, и конструкции рычажной системы, дублирующей руку оператора, с ее метрическими параметрами. Для проверки работоспособности конструкции экзоскелета использовалась имитационная программа. Погрешность показаний углов поворота локтевого сустава экзоскелета в имитационной модели не превышает 3,4%, плечевого сустава – 5,2%. Представленная структура экзоскелета позволит регистрировать текущие положения частей руки оператора при выполнении технологических

операций и формировать управляющие команды для точного их воспроизведения звеньями манипулятора.

Ключевые слова – экзоскелет верхней конечности, рычажный механизм, регистрация движений, копирующее управление

1. Введение

С развитием робототехнических систем наблюдается большой интерес к вопросам замены труда человека в потенциально опасных областях деятельности с их помощью. Однако, уровень развития робототехники в настоящее время не позволяет использовать полностью робототехнические средства в виду того, что современные роботы не имеют достаточного уровня автономности и возможности самостоятельного принятия сложных решений, особенно в потенциально агрессивных средах и ситуациях, сопряженных с риском для человека. В связи с этим актуальным является копирующий тип управления, особенно для исполнительных устройств робота – манипуляторов.

Анализ имеющихся публикаций по этой тематике показал, что для реализации копирующего типа управления манипулятором применяются специальные аппаратные комплексы, позволяющие производить захват движений оператора. Часто в качестве таких устройств используется специализированная перчатка, например, в работе [1] рассматривается гибридная система, состоящая из сенсорного 3-D-печатного мягкого роботизированного захвата и мягкой тканевой тактильной перчатки. В работе [2] представлена конструкторская разработка подобного устройства, а в работе [3] описан метод копирующего управления.

Труды Седьмой всероссийской научной конференции "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", 28-30 мая, Уфа-Ставрополь, Ханты-Мансийск, Россия, 2019

Проблемы захвата повседневных объектов описаны в [4].

Использование в качестве управляющего устройства перчатки обладает рядом преимуществ, таких, как удобство использования и малый габаритные характеристики. Однако, ее использование не позволяет определить точное положение локтя оператора, что является существенным недостатком в задачах, где требуется знание точного положения локтя оператора, таких как, обучение специальным движениям и выполнение манипуляций в ограниченном пространстве с препятствиями. Устранить данный недостаток позволяет использование экзоскелетов, полностью копирующих кинематическую схему руки оператора.

В работе [5] представлены конструкторские решения по созданию экзоскелета нижних конечностей для усиления нагрузки. Экзоскелеты верхних конечностей в настоящее время широко используются в медицине для реабилитации больных [6]–[8] и облегчения физических усилий [9].

В статье [10] представлены содержание этапов проектирования, моделирования и реализации системы, которая позволяет управлять роботизированной рукой с помощью команд движения, захваченных экзоскелетом. В этой работе рассмотрена реализация экзоскелета верхней конечности с наклонным и вертикально подвижным плечевым суставом, однако рассматривается всего 5 степеней свободы. В работе [11] описаны механические конструкции активных экзоскелетов верхних конечностей, приведена анатомия и движения верхней конечности человека используемая при разработке конструкторских решений.

В настоящей статье в качестве объекта управления рассматриваются антропоморфные манипуляторы с кинематической структурой, имеющей 7 степеней подвижности. Прототип антропоморфного манипулятора описан в [12]. Прототипом устройства управления является копирующий манипулятор [13] и задающее устройство копирующего типа [14]. В качестве задающего устройства в настоящей работе рассматривается экзоскелет верхних конечностей. Разрабатываемое изделие в дальнейшем именуется экзоскелет.

Для регистрации положений и управления антропоморфным манипулятором разрабатываемое устройство использует методы решения задачи кинематики [15]: прямой задачи кинематики, через представление Денавита-Хартенберга для определения декартовых координаты плечевого сустава, запястного сустава антропоморфного манипулятора и руки оператора и обратной задачи кинематики, для определения декартовых координат локтевого сустава антропоморфного манипулятора. Для решения задачи динамики в статье [16] описан метод прогнозирования движений руки оператора для формирования законов движения узлов антропоморфного манипулятора.

В настоящей работе предлагается структура экзоскелета верхних конечностей для регистрации движений

оператора при копирующем управлении. Для этой структуры описаны и обоснованы конструкторские решения, позволяющие точно воспроизводить движения звеньев манипулятора в реальном масштабе времени.

2. Описание и обоснование конструкции

2.1. Область применения разработки

Разрабатываемое решение по принципу работы представляет собой устройство копирующего типа, которое предназначено для управления аналоговыми и аналого-цифровыми машинами. Оно позволит обеспечить управление антропоморфными робототехническими системами и выполнять манипуляции с различными предметами.

С помощью экзоскелета можно решать задачи:

- верификации методики решения обратных задач кинематики и динамики;
- регистрации текущих положений частей руки оператора при выполнении технологических операций и формирования управляющих команд в реальном масштабе времени.

Экзоскелет позволяет выполнять следующие функции при управлении антропоморфным манипулятором

- отработка на виртуальной 3D модели навыков профессиональных движений оператора за счет точной регистрации относительных движений руки человека, при взаимодействии внешними объектами;
- фиксация всех движений оператора для проведения их объективного анализа и корректировки;
- достижение максимальной достоверности имитации реальных условий работы за счет совмещения функции, регистрации движения руки человека с формированием внешней силовой нагрузки на выполняемые движения.

Область применения разрабатываемого изделия – управление антропоморфными манипуляторами, технологические операции, профессиональные сферы деятельности, робототехника.

2.2 Структура изделия

Для решения задачи исследования разработана структура экзоскелета:

- 1) комплект навесного крепления экзоскелета на оператора;
- 2) рычажная система, дублирующая руку оператора;
- 3) аппаратный комплекс регистрации относительного поворота звеньев рычажной системы;
- 4) стенд для выполнения калибровки;
- 5) программный комплекс.

Даная структура обусловлена тем, что необходимо логически разделить устройство изделия на электрическую и механическую части. К электрической

части относится пункт 3, а к механической – пункты 1, 2,4. Кроме того, для работы изделия необходимо специализированное программное обеспечение в виде программного комплекса. Авторами статьи разработан и зарегистрирован комплект программных модулей для предлагаемой структуры экзоскелета верхних конечностей [17]–[21]. Стенд для калибровки включается в состав комплекса, но является отдельным изделием и не рассматривается в данной статье. Схема деления, разрабатываемого экзоскелета представлена на рисунке 1.

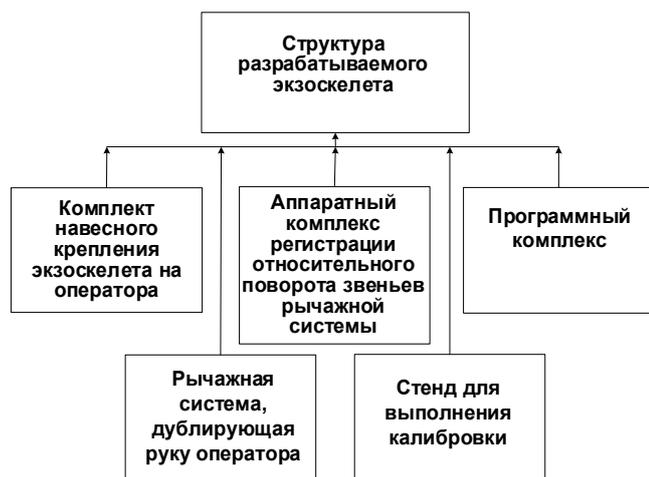


Рисунок 1. Структурная схема деления, разрабатываемого экзоскелета

Далее рассмотрим подробно описание структурных элементов экзоскелета.

2.3. Описание и обоснование конструкции аппаратного комплекса регистрации относительного поворота звеньев рычажной системы

В аппаратный комплекс регистрации относительного поворота звеньев рычажной системы входят:

- датчики углового положения, устанавливаемые для считывания углов относительных положений звеньев;
- постоянные магниты датчиков углового положения;
- плата управления датчиками углового положения.

В качестве магнита датчиков углового положения используется магнит для энкодера 6x2,5мм серии AS5000. В качестве платы управления датчиками углового положения используется плата Costume Rev1.0.

Для регистрации углов каждый шарнир экзоскелета снабжен датчиком углового положения, устанавливаемым для считывания изменения углов относительных положений звеньев.

В конструкции экзоскелета используются 14-битные датчики угловых положений Austriamicrosystems AS5048A-HTSP. Датчики угловых положений

VII Всероссийская научная конференция "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", Уфа-Ставрополь-Ханты-Мансийск, Россия, 2019

установлены в кинематических парах, указанных на рисунке 2.

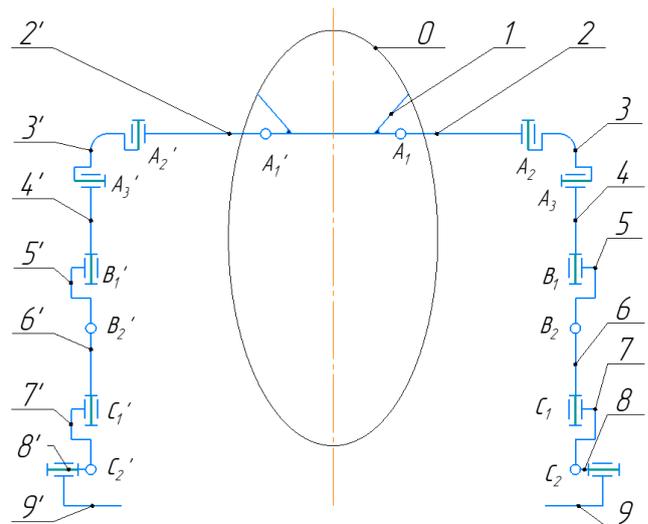


Рисунок 2. Кинематическая структурная схема экзоскелета

где 0 – условное изображения элементов крепления экзоскелета к торсу оператора, 1 – скрепляющая пластина, 2...9 – звенья «левого» экзоскелетного модуля, 2'...9' – звенья правого экзоскелетного модуля, A1..C2 – кинематические пары «левого» экзоскелетного модуля, A1'..C2' – кинематические пары «правого» экзоскелетного модуля

Углы поворотов, соответствующие каждой кинематической паре, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Реализованные углы поворотов в шарнирах

№	Наименование кинематической пары	Обозначение угла поворота в градусах	Реализуемая степень подвижности оператора
1	A_1 / A_1'	0..90	Движение плеча в фронтальной плоскости
2	A_2 / A_2'	-20..90	Движение плеча в сагиттальной плоскости
3	A_3 / A_3'	0..90	Движение плеча в горизонтальной плоскости
4	B_1 / B_1'	0..110	Сгиб в локтевом суставе оператора
5	B_2 / B_2'	-90..45	Ротация предплечья
6	C_1 / C_1'	-30..30	Качание кисти
7	C_2 / C_2'	-70..70	Качание кисти

Расположение энкодеров в шарнирах представлено на рисунке 3. Плата магнитного энкодера 1 закрепляется посредством двух винтов на неподвижном звене 4. На подвижном звене 3 устанавливается магнит энкодера 2, при перемещении звена 3 относительно звена 4 плата энкодера считывает перемещение полюсов магнита и преобразует круговое смещение в цифровой сигнал, который передается для последующей обработки на плату блока электроники экзоскелета.

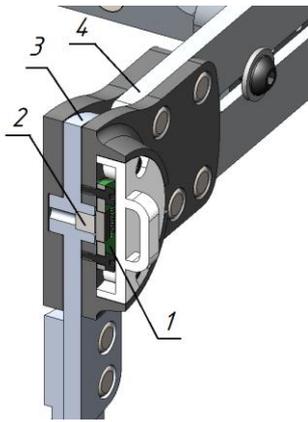


Рисунок 3. Расположение энкодера в шарнире экзоскелетного комплекса

где 1 – плата магнитного энкодера, 2 – магнит энкодера, 3 – подвижное звено, 4 – неподвижное звено

Датчики угловых положений устанавливаются в кинематических парах. Шарниры экзоскелета, оснащенные датчиками угловых положений, реализованы в конструкции, как показано на общем виде на рисунке 3, согласно кинематической схеме, приведенной на рисунке 4.

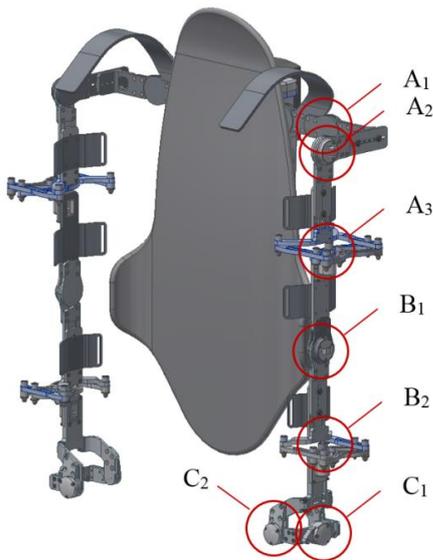


Рисунок 4. Расположение кинематических пар, оснащенных датчиками угловых поворотов (на правой части экзоскелета, кинематические пары расположены зеркально)

Датчики углового положения в кинематических парах A1, A2 и B1 реализованы как показано на рисунке 5.

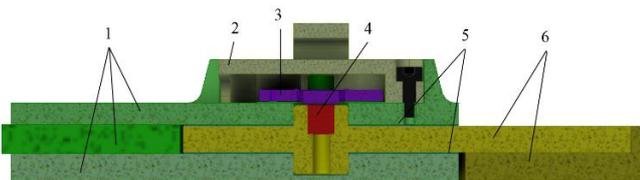


Рисунок 5. Схемная проработка кинематических пар A1, A2 и B1

где 1 – детали i -го звена, 2 – крышка датчика, – электронная плата датчика, 3 – электронная плата датчика, 4 – постоянный магнит датчика, 5 – разделительные кольца, 6 – детали звена $i+1$. i -ое звено и звено $i+1$ в зависимости от выбора кинематической пары обозначаются:

для кинематической пары A1 1 и 2 соответственно;

для кинематической пары A2 2 и 3 соответственно;

для кинематической пары B1 5 и 6 соответственно.

Датчики угловых положений в кинематических парах A3, и B2 реализованы, как показано на рисунке 6.

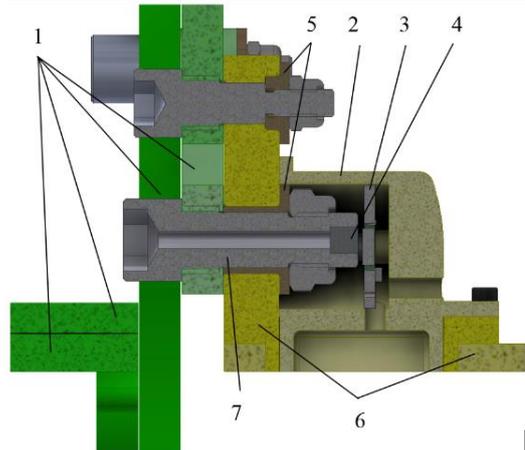


Рисунок 6. Схемная проработка кинематических пар A3 и B2

где 1 – детали i -го звена, 2 – кожух датчика, 3 – электронная плата датчика, 4 – постоянный магнит датчика, 5 – втулки скольжения, 6 – детали звена $i+1$, 7 – ось, выполненная из винта

Втулки скольжения 6 выполняются из полимерного материала с низким коэффициентом трения по алюминиевым сплавам. Они выполняют функцию снижения момента трения между деталями звеньев 4 и 6; 6 и 7.

Датчики углового положения в кинематических парах C1 и C2 реализуются, как показано на рисунке 7.

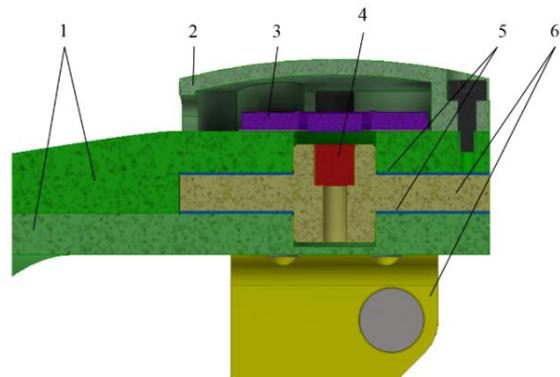


Рисунок 7. Схемная проработка кинематических пар C1 и C2

где 1 – детали звена i , 2 – крышка датчика, 3 – электронная плата датчика, 4 – постоянный магнит

датчика, 5 – разделительные кольца, 6 – детали звена $i+1$

2.4 Описание комплекта навесного крепления на оператора

Крепление экзоскелета к телу оператора выполняется с помощью накладок, ремней плеч и предплечий и поясного ремня на липучках. В состав навесного крепления на оператора входят:

- ремни на текстильных застежках (липучки);
- металлические скобы;
- проушины;
- пластиковое крепление для фиксации запястного сустава;
- гибкий панцирь с восемью полипропиленовыми пластинами для фиксации спины и поясничного сустава.

Габаритные размеры ремней выбираются следующим образом. Длина ремня должна позволять регулировку навесного крепления, исходя из антропоморфных параметров оператора и выполнять надежную фиксацию. Ширина ремня также должна прочно фиксировать крепление. Концы ленты выполняются сшивкой нитями, обрабатываются таким образом, чтобы избежать распускания и расслоения. Швы выполняются швейной машиной закрытым стежком.

2.5. Описание и обоснование конструкции рычажной системы, дублирующей руку оператора

Рычажный механизм представляет собой конструкцию из соединенных между собой вращательных и поступательных пар звеньев.

Рычажная система обеспечивает ротацию плеча и предплечья оператора. Особенность конструкции заключается в том, что ось ротации механизма совпадает с осью ротации суставов оператора за счет вынесенной рычажной системы. В состав рычажной системы входит 4 рычага и 2 звена. Входное звено является статичным, а выходное – поворотным. Рычажный механизм не оснащается внешними приводами. Движения звеньев механизма обеспечиваются за счет естественных движений человека.

Для надежной фиксации экзоскелета на операторе и комфортной работы необходимо, чтобы конструкция имела ряд изменяемых параметров. Для определения изменения основных геометрических параметров экзоскелета принят ряд основных движений руки оператора: подъем руки из положения вдоль туловища перед собой на 180° , подъем рук в стороны из положения вдоль туловища на 180° , повороты кисти оператора вокруг оси на 180° , прямая рука вытянута вдоль туловища. Рычажная система в своих подвижных соединениях должна иметь большие рабочие диапазоны. Шарниры, соединяющие подвижные части

рычажной системы, должны иметь рабочий диапазон не менее 160° .

Исходя из вышеприведенного, примем следующие возможные антропометрические показатели оператора, под которые должен подходить экзоскелет (рис. 12):

- обхват талии – 66-139 см;
- обхват грудной клетки – 78-141 см;
- длина руки – 73,8-82,7 см;
- высота туловища – 52-58,2 см;
- ширина плеч – 36,8-45,5 см.

Экзоскелет спроектирован таким образом, чтобы в нем можно было изменять основные длины звеньев и смещать места крепежа для удовлетворения антропометрических показателей, указанных на рисунке 8.

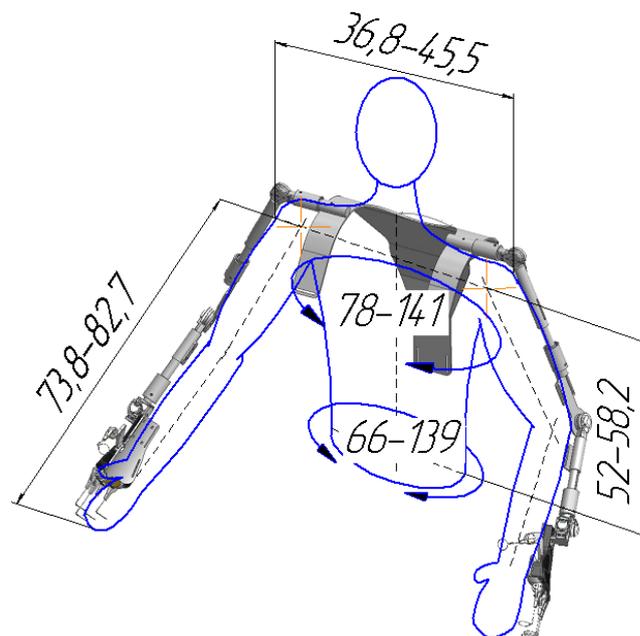


Рисунок 8. Диапазон регулирования размеров рычажной системы (см)

Обоснованием выбора длин звеньев и необходимых их регулировок являются основные антропометрические характеристики человека. Принятые основные длины звеньев рычажной системы, дублирующей руку оператора, показаны на рисунке 9, метрические параметры на рисунке – 10.

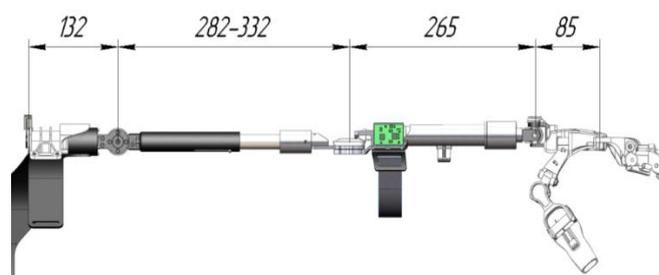


Рисунок 9. Основные длины звеньев рычажной системы (см)

Рычажная система рассчитана на человека ростом 175...185 см, имеющего некрупное телосложение. В узлах плеча и предплечья имеются места регулировки навесного крепления для более точной подгонки под оператора. Метрические параметры рычажной системы приведены на рисунке 10.

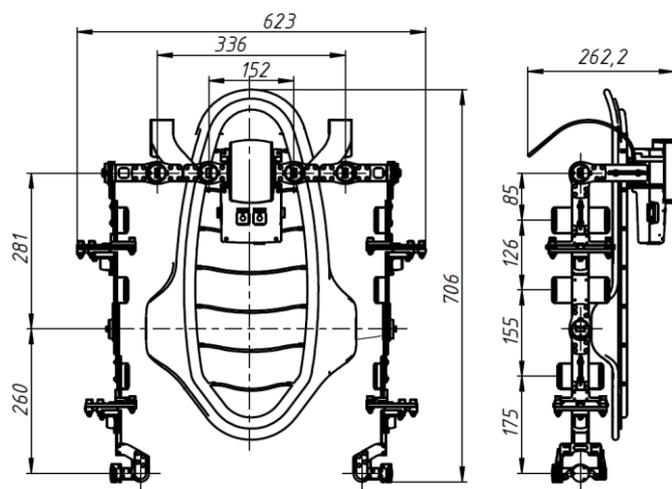


Рисунок 1. Основные метрические параметры экзоскелета (см)

Рычажная система представляет собой изделие, состоящее из 3-х основных частей, соединяемых между собой. Каждая из 3-х частей состоит из деталей, изготавливаемых из алюминия и пластиковых накладок. В узлах, обеспечивающих сгиб, ротацию и качание устройства, установлены энкодеры, отслеживающие соответствующие движения оператора.

3. Результаты

Основными результатами настоящей работы являются конструкторские решения по созданию аппаратных составных частей регистрации углов относительного поворота звеньев экзоскелетного комплекса, а также технические решения по разработке составных частей экзоскелета, позволяющие реализовать точное воспроизведение звеньями антропоморфного манипулятора движений оператора.

Общий вид разработанного экзоскелета приведен на рисунке 11.



Рисунок 11. Внешний вид разработанного экзоскелета

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

Для проверки работоспособности конструкции использовалась имитационная программа. Имитационная модель экзоскелета в разных положениях приведена на рисунке 12.

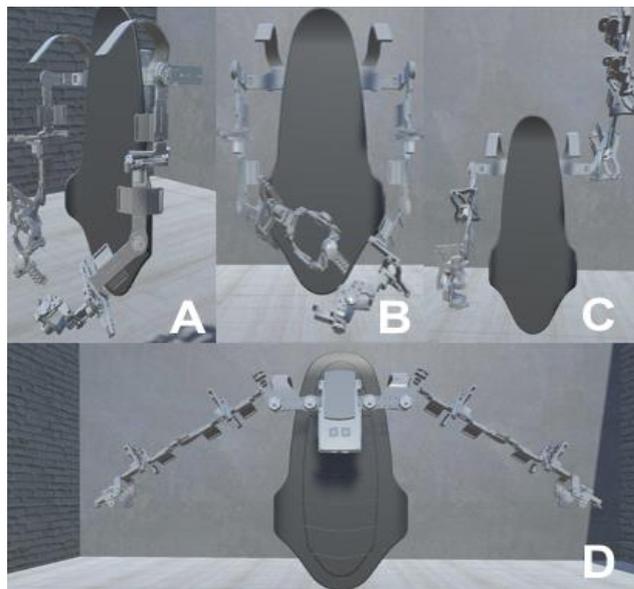


Рисунок 12. Имитационная модель: А – вид сбоку, В – ротация в локтевом суставе, С – перемещение в плечевом суставе, D – подъема в плечевом суставе

При перемещении руки оператора в надетом экзоскелете, в соответствующем направлении, происходит передвижение звеньев имитационной модели задающего устройства на заданный угол (рис. 13).

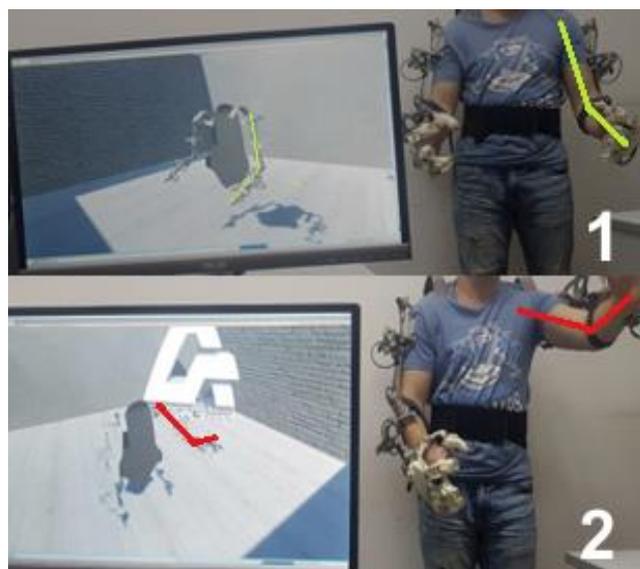


Рисунок 2. Отображение согласованности имитационной модели и действий оператора

Виртуальные углы модели ограничены заданными значениями в таблице, значения углов поворота рычажной системы приведены в таблице 1. Соответствие углов поворота локтевого и плечевого суставов экзоскелета и имитационной модели приведены в таблице 2.

Таблица 2. Соответствие углов поворота локтевого и плечевого суставов экзоскелета и имитационной модели

№	Угол поворота локтевого сустава (град.)		Погрешность (%)		Угол поворота плечевого сустава(град.)		Погрешность (%)	
	Экзоскелет	Имитационная модель	Абсолютная,	Относительная	экзоскелет	Имитационная модель	Абсолютная,	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

Получены следующие результаты: погрешность показаний углов поворота локтевого сустава экзоскелета и имитационной модели не превышает 3,4%, плечевого и имитационной модели – 5,2%.

4. Обсуждение

В настоящей статье представлено задающее устройство копирующего типа в виде экзоскелета. Конструкторские решения предназначены для регистрации текущих положений частей руки оператора при выполнении технологических операций.

Дальнейшая работа требует исследований, подтверждающих технологичность и надежность конструкции. Целесообразно проводить исследования в области разработки механических частей и кинематической структуры для захвата движений всего тела оператора, к этому направлению можно отнести: синтез полной кинематической структуры и разработка отображения степеней подвижности человека на степени подвижности робота. А также синтез подходящей структуры полного экзоскелета, которая позволит захватывать движение оператора в необходимых степенях подвижности.

5. Заключение

В статье для предлагаемой структуры экзоскелета верхних конечностей представлено описание и обоснование конструкторских решений в области регистрации текущих положений частей руки оператора при выполнении технологических операций.

Разработана кинематическая структурная схема, выполнена схемная реализация соответствующих кинематических пар и расположение датчиков угловых поворотов в узлах рычажного механизма. Выполнена разработка конструкции рычажной системы, дублирующей руку оператора с ее метрическими параметрами и комплекта навесного крепления на оператора.

Представленная разработка позволяет выполнять регистрацию текущих положений частей руки оператора при выполнении технологических операций и формирования управляющих команд для точного их воспроизведения движениями звеньев манипулятора в реальном масштабе времени. В дальнейших исследованиях планируются полномасштабные испытания на полноразмерных антропоморфных роботах и манипуляторах.

Acknowledgments (благодарности)

Исследование выполнено в рамках реализации научного проекта по теме «Разработка программно-аппаратного комплекса системы управления на основе решения обратной задачи динамики и кинематики» в рамках ФЦПР 2014-2020 (уникальный идентификатор RFMEFI57517X0166) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Список используемых источников

- 1 Н. L. Ren et al., “Hybrid Tele-Manipulation System Using a Sensorized 3-D-Printed Soft Robotic Gripper and a Soft Fabric-Based Haptic Glove,” IEEE Robot. Autom. Lett., vol. 2, no. 2, pp. 880–887, 2017.
- 2 P. Bharath Vamsi and V. Ragavendra Rao, “Design and fabrication of soft gripper using 3D printer,” IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 402, p. 012026, Sep. 2018.
- 3 L. Huang, T. Kawamura, and H. Yamada, “Master-Slave Control Method with Force Feedback for Grasping Soft Objects using a Teleoperation Construction Robot,” Int. J. Fluid Power, vol. 13, no. 2, pp. 41–49, Jan. 2012.
- 4 K. Matheus and A. M. Dollar, “Benchmarking grasping and manipulation: Properties of the Objects of Daily Living,” in 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010, pp. 5020–5027.
- 5 W. Kim, H. Lee, D. Kim, J. Han, and C. Han, “Mechanical design of the Hanyang Exoskeleton Assistive Robot(HEXAR),” in 2014 14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2014), 2014, pp. 479–484.
- 6 W. Kim, H. Kim, D. Lim, H. Moon, and C. Han, “Design and Kinematic Analysis of the Hanyang Exoskeleton Assistive Robot (HEXAR) for Human Synchronized Motion,” 2017, pp. 275–279.
- 7 B. Gao et al., “Embedded System-based a Portable Upper Limb Rehabilitation Robot,” in 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2018, pp. 631–636.

- 8 D. Wang, Q. Meng, Q. Meng, X. Li, and H. Yu, "Design and Development of a Portable Exoskeleton for Hand Rehabilitation," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 26, no. 12, pp. 2376–2386, Dec. 2018.
- 9 R. F. Natividad, S. W. Hong, T. M. Miller-Jackson, and C.-H. Yeow, "The Exosleeve: A Soft Robotic Exoskeleton for Assisting in Activities of Daily Living," 2019, pp. 406–409.
- [10] U. M. Morales, C. G. Mosquera, M. M. Sanchez, and H. W. Chamorro, "Upper Limb Exoskeleton Design and Implementation to Control a Robotic Arm," in 2017 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS), 2017, pp. 73–78.
- 11 R. Gopura, K. Kiguchi, Gopura and K. Kiguchi, "Mechanical designs of active upper-limb exoskeleton robots: State-of-the-art and design difficulties," in 2009 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, 2009, pp. 178–187.
- 12 А. А. Богданов, Кутлубаев, И. М., А. Ф. Пермяков, и В. Б. Сычков, "Антропоморфный манипулятор," RU 146 552 U1.
- 13 А. А. Богданов, И. Г. Жиденко, Д. В. Кияткин, Кутлубаев, И. Мухаметович, and А. Ф. Пермяков, "Копирующий манипулятор," RU 135 956 U1.
- 14 А. П. Батрашкин, А. А. Богданов, М. Р. Иксанов, Кутлубаев, И. Мухаметович, and А. Ф. Пермяков, "Задающее устройство копирующего манипулятора," RU 169 864 U1.
- 15 F. B. Tebueva, V. I. Petrenko, V. O. Antonov, and M. M. Gurchinsky, "The Method for Determining the Relative Positions of the Operator's Arm for Master-Slave Teleoperation of Anthropomorphic Manipulator," *Int. Rev. Mech. Eng.*, vol. 12, no. 8, p. 694, Aug. 2018.
- 16 V. I. Petrenko, F. B. Tebueva, M. M. Gurchinsky, V. O. Antonov, and J. A. Shutova, "Solution of the dynamics inverse problem with the copying control of an anthropomorphic manipulator based on the predictive estimate of the operator's hand movement using the updated Brown method," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 450, p. 042013, Nov. 2018.
- 17 В. И. Петренко, Ф. Б. Тебуева, В. О. Антонов, М. М. Гурчинский, and Е. Н. Ласкина, "Программный комплекс визуализации траектории движения антропоморфного трехзвенного манипулятора в объемном пространстве с препятствием." : свид. 2018617979 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СКФУ (RU). – № 2018615094; заявл. 21.05.2018; опубл. 05.07.2018, Реестр программ для ЭВМ., р. 1, 2018.
- 18 В. И. Петренко, Ф. Б. Тебуева, В. О. Антонов, and М. М. Гурчинский, "Программа для решения обратной задачи динамики на основе прогнозной оценки движения руки оператора." свид. 2018666426 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СКФУ (RU). – № 2018663795; заявл. 04.12.2018; опубл. 17.12.2018, Реестр программ для ЭВМ., р. 1, 2018.
- 19 В. И. Петренко, Ф. Б. Тебуева, В. О. Антонов, М. М. Гурчинский, and Д. Е. Пижевский, "Программа расчета оптимального значения обобщенных координат антропоморфного манипулятора по критерию энергопотребления, для перемещения эффектора в заданную точку." : свид. 2018617980 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СКФУ (RU). – № 2018615092; заявл. 21.05.2018; опубл. 05.07.2018, Реестр программ для ЭВМ., р. 1, 2018.
- 20 В. И. Петренко, Ф. Б. Тебуева, В. О. Антонов, М. М. Гурчинский, and А. С. Павлов, "Программа для расчета углов поворота руки оператора на основе обобщенных координат задающего устройства копирующего типа в реальном масштабе времени." : свид. 2018619861 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СКФУ (RU). – № 2018617423; заявл. 16.07.2018; опубл. 14.08.2018, Реестр программ для ЭВМ., р. 1, 2018.
- 21 В. И. Петренко, Ф. Б. Тебуева, В. О. Антонов, and М. М. Гурчинский, "Программа планирования траектории трехзвенного антропоморфного манипулятора на базе итеративной кусочно-линейной аппроксимации." :свид. 2018617978 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СКФУ (RU). – № 2018663795; заявл. 04.12.2018; опубл. 17.12.2018, Реестр программ для ЭВМ., р. 1, 2018.