

На правах рукописи

УДК 004.896:681.5

Бажинова Ксения Владимировна

**УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ В СОСТАВЕ
МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА И ЗАХВАТНОГО УСТРОЙСТВА ПРИ
ВЫПОЛНЕНИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЗАХВАТА И ПЕРЕНОСА
ОБЪЕКТА**

Специальность 05.02.05

Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2018г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: **Лесков Алексей Григорьевич**
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
директор Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Егоров Игорь Николаевич**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Автоматизация технологических
процессов» ВлГУ

Яскевич Андрей Владимирович
кандидат технических наук,
начальник отдела ПАО РКК «Энергия»

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный технологический университет «Станкин» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»)**

Защита состоится «25» декабря 2018 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613 м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.02.

Автореферат разослан «___» 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.02,
кандидат технических наук, доцент



Муратов И.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. В настоящее время при выполнении работ в опасных и труднодоступных для человека условиях применяются, преимущественно, робототехнические системы, управляемые дистанционно. Достоинством дистанционного управления, особенно – в нештатных ситуациях, является использование опыта оператора. Однако при потере связи и ухудшении видимости использовать ручное управление становится невозможным из-за высоких рисков повреждения или потери объекта манипулирования и дорогостоящего оборудования.

При невозможности использования дистанционного управления применяются системы автоматического управления робототехническими системами, которые для выполнения операций захвата и манипулирования используют средства автоматизированного планирования траекторий перемещения звеньев захватного устройства (ЗУ) и исполнительного механизма манипуляционного робота (МР).

Перечень большинства операций МР включает захват и перенос объектов. Под планированием захвата понимается процесс, в ходе которого определяются координаты точек на поверхности объекта, за которые объект захватывается, а также расположение в пространстве ЗУ в момент захвата. В зависимости от того, как распределяются контакты между поверхностью объекта и поверхностями звеньев МР и ЗУ - кисти робототехнической системы, - захваты объектов принято разделять на захваты, выполняемые кончиками ЗУ, и на обхватывающие, или силовые, захваты. Первый тип активно изучается специалистами на протяжении долгого времени. На исследованиях, посвященных этому типу захватов, создана теория захвата, разработаны модели контакта. Захват объектов кончиками пальцев является надежным при наличии трения между поверхностями пальцев и объекта. Такой захват позволяет выполнять разнообразные операции с захватываемыми объектами, чему способствует также наличие широкого спектра высокоточных антропоморфных ЗУ. Однако захват кончиками пальцев, в общем случае, не является достаточно надежным, если нельзя обеспечить количество контактов с объектом, большее или равное трем. Обхватывающие, или силовые, захваты – такие захваты, при которых звенья робототехнической системы частично или полностью обхватывают поверхность объекта или выступа на нем, что позволяет выполнять надежный захват объекта при низком коэффициенте трения между поверхностями звеньев и объекта. Силовые захваты, выполняемые кистью, были рассмотрены в работах Роветты, Окада, Хиросе, Асфура, Варенкампа. Особенностью этих трудов является исследование кинематики и динамики захвата объектов многозвездными механизмами.

В настоящее время широкое распространение получили двупалые ЗУ с количеством фаланг, не превышающим двух. По этой причине разработанная для силового захвата теория на практике применяется редко, так как степеней свободы таких ЗУ недостаточно для выполнения данного типа захвата. Число степеней свободы можно увеличить, если в качестве контактирующих элементов рассматривать звенья МР. Число степеней свободы такой системы (в дальнейшем – система «рука+кисть») больше, чем у ЗУ, рассматриваемого обособленно. Это позволяет осуществлять захват объектов и манипулирование

ими даже при малом коэффициенте трения между поверхностями звеньев и объекта. Кроме того, использование звеньев руки для захвата позволит манипулировать объектами значительно большего диапазона размеров, чем могла бы захватить только кисть, а распределение точек контакта при таком захвате позволит увеличить грузоподъемность всей робототехнической системы «рука+кисть». Возможности, предоставляемые таким подходом к захвату объекта, могут использоваться во многих сферах, включая проведение подводных и космических исследований.

Исследования в области захватов, выполняемых робототехнической системой, включающей МР и ЗУ, как единой системой, пока не получили широкого распространения. Существующие на данный момент подходы к планированию способа захвата объекта учитывают только свойства системы, включающей кисть и объект манипулирования, иными словами, свойства системы «кисть+объект». При планировании движения манипулятора в момент подхода к объекту, а также движения с объектом после его захвата, напротив, рассчитывается только траектория движения руки, а положение пальцев считается неизменным. Это ограничивает возможности робототехнической системы как в случае силового захвата, так и захвата, осуществляющегося кончиками пальцев ЗУ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках мероприятия 1.3 федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (Соглашение от 26 сентября 2017 года № 14.577.21.0247, уникальный идентификатор работ RFMEFI57717X0247).

Цели и задачи. Целью диссертационной работы является разработка и исследование методов управления движением робототехнической системы, состоящей из МР и ЗУ, как единой системы, при автоматическом выполнении операции захвата и переноса объекта. Для достижения цели в работе были поставлены и решены следующие задачи.

1. Разработать математическую модель системы, включающей МР, ЗУ и объект манипулирования (в дальнейшем – система «рука+кисть+объект»), при захвате и переносе объекта манипулирования и выполнить на её основе аналитические исследования процессов захвата и переноса.
2. Разработать методы автоматического планирования захвата объектов робототехнической системой, включающей МР и ЗУ, по известным данным системы технического зрения о положении и геометрической модели объекта, определения свойств такого захвата, оценки его качества.
3. Разработать метод планирования траектории и управления движением робототехнической системы, состоящей из МР и ЗУ, при автоматическом выполнении операции захвата и переноса объекта, в том числе для осуществления силового захвата.
4. Выполнить математическое и компьютерное моделирование системы, включающей МР, ЗУ и объект манипулирования.
5. Разработать натурный экспериментальный стенд для исследования операций автоматического захвата и переноса объекта робототехнической системой, состоящей из МР и ЗУ.

6. Провести экспериментальные исследования движения робототехнической системы, состоящей из МР и ЗУ, при автоматическом выполнении операции захвата и переноса объектов.

Научная новизна:

1. Разработан новый метод планирования автоматического захвата объектов для робототехнической системы вида «рука+кисть», отличающийся учетом при планировании захвата руки МР.
2. Предложен способ оценки качества захвата для робототехнической системы, состоящей из МР и ЗУ, как единой системы.
3. Разработаны структура и методы функционирования системы управления робототехнической системы, состоящей из МР и ЗУ, представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие её работоспособность при выполнении автоматической операции захвата и переноса объектов. Методы функционирования системы управления являются оригинальными в части планирования траектории и управления движением робототехнической системы, состоящей из МР и ЗУ, при автоматическом выполнении захвата и переноса объекта, и отличаются возможностью выполнения силовых захватов.

Практическая ценность. Разработанный метод управления позволяет обеспечить захват объекта при выполнении манипуляционной операции без вмешательства человека-оператора в процесс управления, что важно при выполнении операций в условиях ограничений по линиям связи, а также позволяет снизить требования к степени подготовленности оператора. Предложенные методы планирования и управления позволяют решать задачи автоматического захвата объекта и его перемещения в пространстве за счет согласованных движений всех шарниров робототехнической системы. На практике это позволяет расширить номенклатуру объектов манипулирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод планирования автоматического захвата объектов робототехнической системой, состоящей из МР и ЗУ, как робототехнической системой «рука+кисть», включающий использование информации системы технического зрения о положении объекта, компьютерное моделирование процесса захвата и переноса объекта и оценку качества захвата, и отличающийся возможностью выполнения силового захвата с использованием звеньев МР.
2. Математическая модель захвата объекта системой «рука+кисть» в фазах планирования и выполнения захвата.
3. Способ оценки качества захвата робототехнической системой вида «рука+кисть».
4. Метод планирования траектории и управления движением робототехнической системы, состоящей из МР и ЗУ, обеспечивающий их согласованное автоматическое движение при выполнении захвата и манипулирования объектом, с возможностью осуществления силового захвата.

Достоверность результатов. Моделирование работы разработанной системы управления и экспериментальные исследования проводились на экспериментальной установке, базой которой является функционально-

моделирующий стенд, разработанный в Дмитровском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана. Достоверность результатов моделирования подтверждена сравнением результатов компьютерного моделирования с результатами, полученными в ходе выполнения натурных экспериментов. Экспериментальные исследования подтвердили, что разработанная система управления работоспособна, а ее точность позволяет выполнять манипулирование объектами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и получили положительную оценку на следующих конференциях и научных семинарах: VIII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2015), XI Международная научно-практическая конференция «Пилотируемые полеты в космос» (Звездный городок, 2015), IX Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2016), Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника», (Санкт-Петербург, 2016), XLI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти С.П. Королёва (Москва, 2017), X Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2017).

Публикации. Результаты диссертационной работы нашли отражение в 9 работах, из них 2 работы в изданиях, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 125 печатных страниц с 33 рисунками, 1 таблицей. Список литературы содержит 100 наименований, из них 95 иностранных источников.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, изложена краткая структура диссертации, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены примеры, подтверждающие актуальность исследования управления робототехнической системой, состоящей из МР и ЗУ, при захвате объектов в автоматическом режиме. Выполнен обзор современного состояния исследований, анализ проблем и задач в области автоматического управления манипуляционными системами при захвате и манипулировании объектами. Представлен обзор существующих автоматических робототехнических систем с ЗУ. Описаны основные принципы построения существующих робототехнических систем с ЗУ, а также основные алгоритмы их работы. Особое внимание уделено структуре и алгоритмам функционирования систем управления системами вида «рука+кисть», в частности, методам функционирования системы планирования захвата и планирования траектории движения звеньев робототехнической системы для выполнения захвата. Сравниваются аналитические и эмпирические подходы к планированию захвата. В работах современных исследователей широко применяется моделирование процесса захвата в виртуальной среде с последующим анализом геометрии контакта между поверхностью объекта манипулирования и поверхностями звеньев ЗУ, анализ пространств возможных

воздействий на объект, накладывание ограничений на пространство конфигураций МР. К современным решениям в области планирования захвата объектов можно отнести программные продукты GraspIt, OpenRave, RobSimWork.

Отдельно проведен обзор исследований, посвященных возможности силового захвата и манипулирования объектом с использованием звеньев МР. Под термином силовой захват для робототехнической системы, включающей только ЗУ, подразумевается такой тип захвата, при котором используются не только концы пальцев кисти, но и ее внутренние фаланги. Далее в диссертационной работе проведен обзор методов планирования движения звеньев руки и пальцев кисти манипуляционной системы при выполнении захвата и переноса объекта. Движение пальцев ЗУ робототехнической системы аналогично согласованному движению нескольких МР, установленных на общем основании.

В результате анализа сравнительных характеристик разных алгоритмов, было выявлено, что малым временем вычисления отличаются вероятностные методы планирования и методы, для работы которых не нужно получать решение обратной кинематической задачи для робототехнической системы. Суть первой группы методов заключается в последовательном выполнении решения обратной задачи кинематики для степеней подвижности руки, подбора положения остальных шарниров для конфигурации захвата, проверки на самопересечение звеньев и столкновения с препятствиями. Особенностью второй группы методов является использование дискретизированного распределения пространства достижимости робототехнической системы и поиске в нем траектории подхода к объекту для звеньев МР и ЗУ. Одним из достоинств этих методов является снижение времени на подготовку робототехнической системы к выполнению автоматической операции, поскольку расчет положения пальцев кисти для захвата осуществляется непосредственно перед выполнением операции на основе анализа пространства достижимости пальцев кисти. На основе анализа этих методов была предложена структура системы управления робототехнической системой, состоящей из МР и ЗУ, как робототехнической системы вида «рука+кисть».

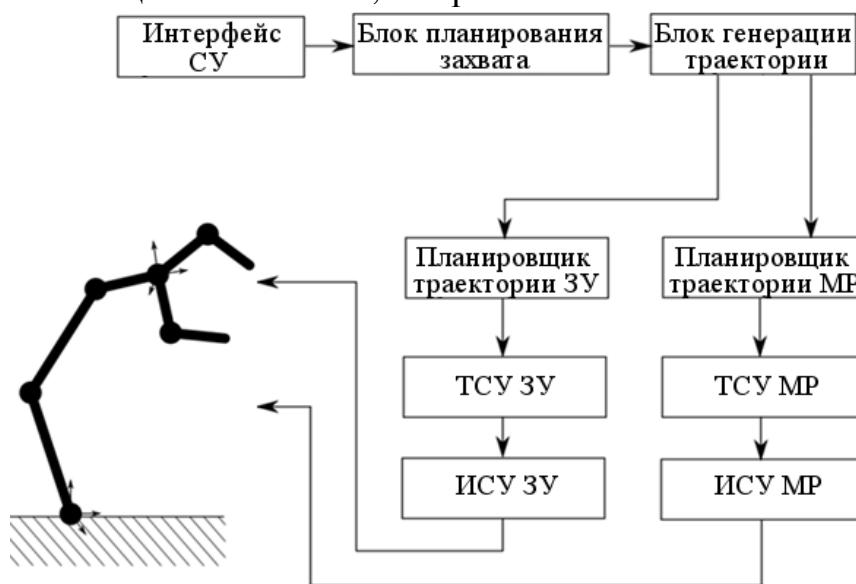


Рис. 1.

Обобщенная структура предложенной системы управления представлена на Рис. 1. Система управления (СУ) включает в себя средства человеко-машинного интерфейса для задания оператором параметров операции, работу технического зрения, работу блока планирования захвата, использующего средства

графического моделирования виртуальной сцены и средства анализа области достижимости МР и звеньев ЗУ, средства генерации гипотез захвата и их верификации на основе критериев качества захвата. Кроме того, СУ включает в себя блок генерации траектории согласованного движения робототехнической системы, блоки планирования траекторий в обобщенных координатах шарниров ЗУ и МР, работу блоков тактической (ТСУ) и исполнительной систем управления (ИСУ). Заканчивается первая глава конкретизацией задачи управления робототехнической системой «рука+кисть», определением области исследования и обоснованием необходимости его проведения.

Вторая глава содержит описание основных положений теории захвата и желаемых свойств захвата. Вводятся в рассмотрение матрица захвата и матрица Якоби, сравниваются матрицы захвата и матрицы Якоби для систем, включающих в себя только кисть и объект, и систем типа «рука+кисть+объект». На основе этого сравнения выводятся условия обеспечения желаемых свойств захвата в системе «рука+кисть+объект». При известных кинематической схеме и конструктивном исполнении ЗУ, а также известной модели поверхности объекта требуется определить обобщенные координаты робототехнической системы, состоящей из МР и ЗУ, при которых происходит контакт поверхностей звеньев робототехнической системы и поверхности объекта. При этом необходимо обеспечивать удержание объекта кистью путем сжимания его с заданной силой и парирование возможных силовых воздействий, что достигается удовлетворением аналитических соотношений, описывающих желаемые свойства захвата. Исследование захвата на обладание этими свойствами заключается в анализе нуль-пространств матриц захвата G и матриц Якоби J_n . Во второй главе диссертации выполнен анализ желаемых свойств захвата и показано, что для обеспечения этих свойств необходимо выполнение следующих соотношений:

$$\dim N(G^T) = 0, \quad (1)$$

$$\dim N(J_n^T G^T) = 0, \quad (2)$$

$$\dim(N(J_n^T) \cap N(G)) = 0. \quad (3)$$

Для системы с m пальцами матрица J_n имеет вид:

$$J_n = [J_{KO} \quad J_P] = \begin{bmatrix} J_{KO1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & J_{KO2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & J_{KOm} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где J_{KO} – матрица Якоби системы «кисть +объект», J_P – матрица Якоби точек присоединения оснований пальцев к запястью.

На основе выражений (2) и (3) можно осуществить планирование движения руки и пальцев путем формирования соответствующих матриц Якоби. Запишем произведение матриц в выражении (2) с учетом структуры матрицы J_n , представленной в уравнении (4), в следующем виде:

$$J_n^T G^T = [J_{KO}^T \quad J_P^T]^T G^T = [J_{KO}^T G^T \quad J_P^T G^T]^T.$$

Матрицы Якоби входят в состав соотношений, определяющих условия обеспечения таких желаемых свойств захвата, как исключение дефектности, управляемость перемещениями объекта и внутренних сил сжатия объекта. Эти соотношения для систем типа «рука+кисть+объект» имеют вид:

$$\dim N(J_{PKO}^T) = 0, \text{ rank}(GJ_{PKO}) = \text{rank}(G) = k, \dim(N(G) \cap N(J_{PKO}^T)) = 0,$$

где k – число степеней свободы объекта. Первое выражение аналогично выполнению условия $\dim(N(J_{KO}^T) \cap N(J_P^T)) = 0$, второе – условия $\dim(N(J_{KO}^T G^T) \cap N(J_P^T G^T)) = 0$. Анализ полученных соотношений показал, что захват в системе «рука+кисть+объект» может обеспечить желаемые свойства даже в том случае, когда эти свойства не обеспечиваются в системе «кисть+объект». Полученные соотношения могут послужить основой для выбора не только координат сочленений «кисти», но и конфигурации «руки» манипулятора в положении, когда происходит захват объекта. Располагая этой информацией, можно осуществить планирование траектории перемещения руки и пальцев кисти из исходного положения к точке захвата и последующего захвата объекта. Рассматриваются существующие показатели качества захвата, анализируются особенности их представления для систем типа «рука+кисть+объект», делается вывод о возможности их применения для решения поставленной в работе задачи.

Третья глава посвящена разработке методов планирования захвата и управления робототехнической системой «рука+кисть» при выполнении захвата и манипулировании объектом. Предлагаемый метод автоматического управления захватом предполагает наличие заранее известных геометрической модели и положения объекта. При этом априорного знания желаемых контактных сил и точной динамической модели МР и ЗУ не требуется.

Гипотеза захвата включает в себя конфигурацию «кисти» в захватном состоянии, и ее положение относительно системы координат, связанной с объектом. Для решения задачи формирования гипотез существует два подхода. Первый заключается в анализе геометрической модели объекта и поиске подходящих точек для осуществления захвата. Особенностью второго подхода является генерация множества случайных захватов и их последующая верификация. Несмотря на меньшее быстродействие, последний подход является менее ресурсоемким и наиболее широко встречается в известных свободных программных продуктах планирования захвата.

Для управления МР и ЗУ, образующими вместе n -звенный механизм с разветвленной кинематической схемой, необходимо получить вектор желаемых значения обобщенных координат сочленений. Одним из способов решения этой задачи является формирование матрицы Якоби J_n манипуляционной системы «рука + кисть». Для обеспечения желаемых свойств захвата при планировании захвата необходимо выбирать такую конфигурацию руки, чтобы $\dim N(J_P^T G^T) = 0$. Кроме того, необходимо спланировать такие траектории руки и кисти, которые обеспечивают отсутствие столкновений и позволяют довести руку и кисть до захватной конфигурации, соответствующей выражениям (1) – (3).

На Рис. 2 показана обобщенная схема работы предложенного метода планирования автоматического захвата. В качестве подсистемы планирования захвата автором выполнена оригинальная модификация подхода, предложенного Варенкампом, Беренсоном и Асфуром, заключающегося в применении алгоритма планирования, основанного на использовании дискретизированного распределения пространства достижимости, представленного в виде сетки в шестимерном пространстве. Ключевой момент

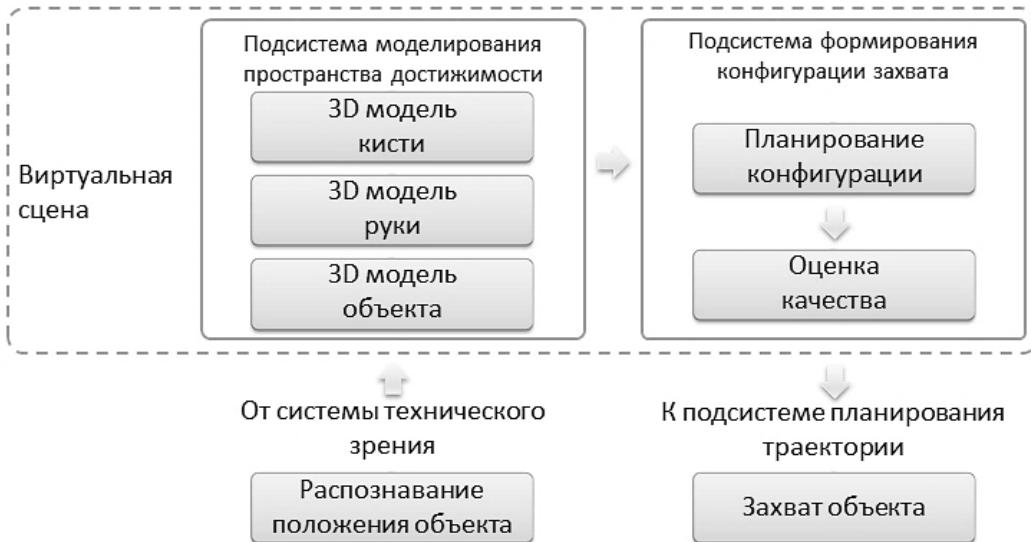


Рис. 2

модификации состоит в рассмотрении достижимости всей робототехнической системы, включающей МР и ЗУ. Чтобы найти достижимое положение объекта в рабочем пространстве робота, предлагается генерировать стохастическими методами 6-мерный вектор, содержащий компоненты линейного и углового положения объекта в декартовой системе координат, и конфигурацию шарниров руки до тех пор, пока для одной из конфигураций не найдется решение обратной задачи кинематики.

На Рис. 3 представлен результат генерации допустимых положений робототехнической системы для осуществления захвата, на Рис. 4 изображено полученное дискретизированное распределение пространства достижимости робототехнической системы в одной из плоскостей рабочего пространства.

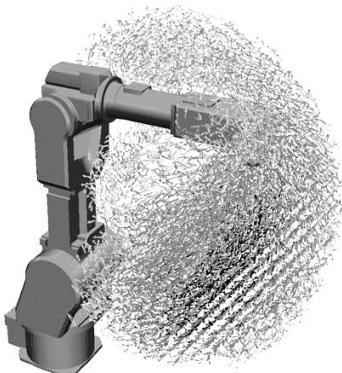


Рис. 3

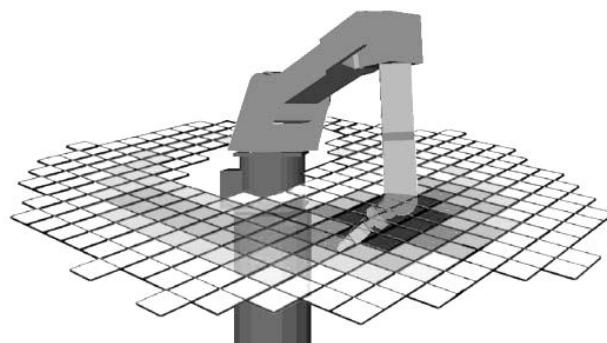


Рис. 4

После этого выполняется проверка подобранный конфигурации на соответствие желаемым свойствам захвата и оценка захвата в соответствии с выбранными критериями качества.

Автоматический захват и манипулирование объектом в предлагаемой автором системе управления достигаются за счет работы системы планирования траектории и системы отслеживания траектории таким образом, что одновременно выполняются две задачи: позиционирование кисти и движение звеньев руки. Для выполнения силового захвата объекта траектория движения кисти манипуляционной системы должна быть рассчитана таким образом, чтобы кисть перемещалась вдоль поверхности объекта, при этом рука будет двигаться вслед за кистью, «оборачиваясь» вокруг объекта, как показано на Рис. 5, а, б. На Рис. 5, а обозначено: $СК_B$ – базовая система координат (СК),

CK_K – СК основания кисти, CK_i – СК i -того пальца кисти, CK_O – СК объекта, $l_{iK}^{(K)}$ – вектор, проведенный из начала инструментальной СК кисти в СК i -того пальца, $l_{KB}^{(B)}$ – вектор, проведенный из начала базовой СК в инструментальную СК кисти, $l_{O_i}^{(O)}$ – вектор, проведенный из начала СК i -того пальца в СК, связанную с центром масс объекта, $l_{OB}^{(B)}$ – вектор, проведенный из начала базовой СК в СК, связанную с центром масс объекта.

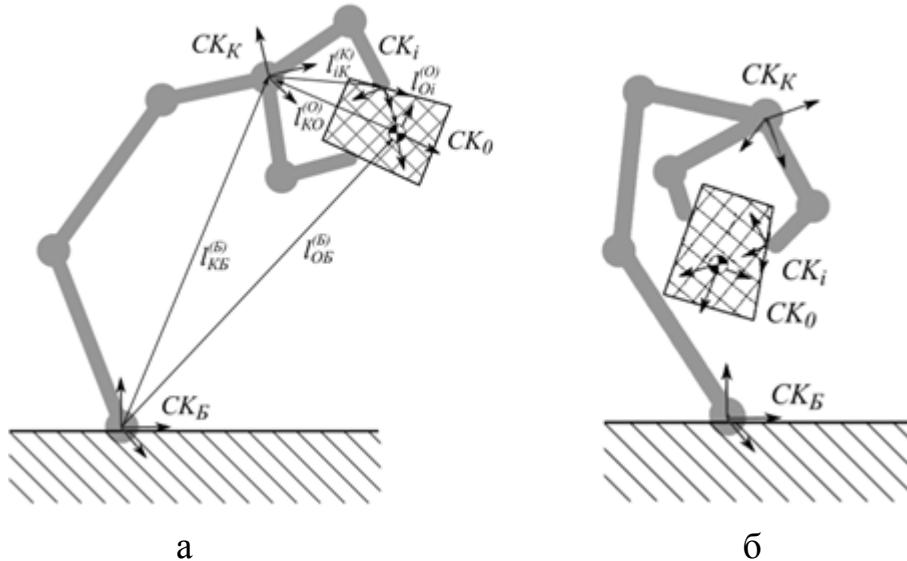


Рис. 5

В работе представлена модификация методов кинематического управления, которая использует математическое представление в системе управления положения кисти и звеньев руки манипуляционного робота, а также информацию о местоположении объекта относительно звеньев манипуляционной системы, как входные сигналы для планирования траектории в пространстве обобщенных координат сочленений манипуляционной системы. Ключевой момент модификации заключается в использовании методов, позволяющих планировать согласованное движение всех звеньев манипуляционной системы, включая как руку, так и пальцы кисти для обеспечения силового захвата, то есть захвата, при котором в контакт с поверхностью объекта входят не только кончики пальцев кисти, но и другие звенья манипуляционной системы.

Для решения задачи управления в динамической среде в диссертационной работе предложен следующий алгоритм. Для обеспечения планирования траектории движения в пространстве обобщенных координат сочленений при наличии неопределенностей в системе «рука+кость+объект» предлагается использовать сигнал управления $U_e(t) \in \mathbb{R}^p$ для контроллера положения кисти в пространстве декартовых координатах, и сигнал управления $U_m(t) \in \mathbb{R}^n$ для контроллера положений звеньев, записанных в пространстве координат сочленений.

Предложенные законы управления, реализуемые контроллером положения кисти и контроллером положений звеньев, можно записать в виде:

$$\dot{q}(t) \triangleq J_n^+ U_e + (I_n - J_n^+ J_n) U_m. \quad (5)$$

Контроллер положения «кисти» $U_e(t) \in \mathbb{R}^p$ реализует закон управления,

который можно записать следующим образом:

$$U_e \triangleq g(x_n) + K_e e + k_n \left\| \frac{\partial V(x_d)}{\partial x_d} \right\|^2 \rho^2(x_n, x_d) e, \quad (6)$$

где $g(x_n) \in \mathbb{R}^p$ – вектор скорости в декартовом пространстве, $K_e \in \mathbb{R}^{p \times p}$ – положительно определенная диагональная матрица усиления, $k_n \in \mathbb{R}^+$ – скалярный коэффициент усиления, $V(t_d)$ – дифференцируемая, неотрицательная функция, $\rho(\cdot) \in \mathbb{R}$ – известная положительная функция, предполагаемая определенной при условии, что $x_d(t)$ и $x_n(t)$ определены, $e(t) \in \mathbb{R}^p$ – ошибка позиционирования СК «кисти», которая определяется следующим образом:

$$e \triangleq x_d - x_n,$$

где $x_d(t) \in \mathbb{R}^p$ – желаемое положение СК «кисти» в пространстве задач. Методы получения $\rho(x_n, x_d)$ для конкретной операции представлены в работах Макинтайр, Диксона, Доусона и Ксиана. Для управления манипуляционной системой «рука + кисть» желаемая траектория определяется следующим образом:

$$\dot{x}_d(t) \triangleq g(x_n).$$

Тогда закон управления (6), реализуемый контроллером положения «кисти», обеспечивает $\|e(t)\| \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$, где

$$\dot{e} = -K_e e - k_n \left\| \frac{\partial V(x_d)}{\partial x_d} \right\|^2 \rho^2(x_n, x_d) e$$

Следует уточнить, что при использовании контроллера положения кисти без контроллера положения звеньев, описание которого дано ниже, расчет траектории движения кисти в обобщенных координатах шарниров может дать траекторию, при движении по которой контакт между поверхностью объекта и поверхностями звеньев манипуляционной системы возникнет до выведения кисти в желаемое положение относительно объекта.

Чтобы избежать этого, автор использовал контроллер положения звеньев в пространстве обобщенных координат $U_m(t) \in \mathbb{R}^n$ реализующий закон управления, который можно записать следующим образом:

$$U_m \triangleq -k_m \left[J_s (I_n - J_n^+ J_n) \right]^T y_a, \quad (7)$$

где $k_m \in \mathbb{R}^+$ – коэффициент усиления, $y_a \in \mathbb{R}$ – вспомогательный скалярный сигнал.

Вектор $J_s \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ определен как

$$J_s = \frac{\partial y_a}{\partial \begin{bmatrix} x_1^T & x_2^T & \dots & x_n^T \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} J_1 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix},$$

где $x_i = J_i \dot{q}$ и $J_i \in \mathbb{R}^{p \times n}$ – матрица Якоби i -того сочленения, связывающая скорости сочленений и скорости в декартовом пространстве.

Сигнал $y_a(t)$ содержит информацию о геометрии поверхности объекта и его положении относительно положения манипулятора. В работах Татлтичиогл,

Макинтайр, Доусона и Уолкера представлена подробная информация об вспомогательном сигнале для положения звеньев руки при управлении манипулятором робота с избыточной кинематической цепью.

Сигнал $y_a(t)$ определяется автором следующим образом:

$$y_a \triangleq \sum_{i=1}^n h_{ai}(x_i),$$

где n – число звеньев манипуляционной системы с избыточной кинематической цепью, $x_i = [\bar{x}_{i1} \ \bar{x}_{i2} \ \dots \ \bar{x}_{ip}]^T \in \mathbb{R}^p$ – координата i -того сочленения в декартовом пространстве, $h_{ai}(x_i) \in \mathbb{R}$ – функция, которая связывает информацию о геометрии поверхности объекта с положением i -того сочленения. Функция $h_{ai}(x_i)$ имеет вид:

$$h_{ai}(x_i) = k_{hi} \exp(-\alpha_i \beta_i^2(x_i)), \quad \forall i = 1, \dots, n,$$

где $k_{hi}, \alpha \in \mathbb{R}^+$ – постоянные значения, $\beta_i(x_i) \in \mathbb{R}$ – функция, значение которой для i -того сочленения положительно, если поверхность объекта не в контакте с поверхностью звеньев манипуляционной системы, причем $\beta_i(x_i) \in L_\infty$ при $x_i(t) \in L_\infty$.

Закон управления (7), реализуемый контроллером положения звеньев, обеспечивает управляемость $y_a(t)$ в следующем смысле:

$$|y_a(t)| \leq \sqrt{|y_a(t_0)|^2 \exp(-2at) + \frac{b}{a}}.$$

Таким образом, вспомогательный сигнал $y_a(t)$ может быть ограничен экспоненциально убывающей функцией. Тогда для момента захвата, когда звенья «руки» находятся в контакте с поверхностью объекта манипулирования, сигнал $y_a(t)$ достигнет постоянного значения

$$y_a(t) = \sum_{i=1}^n k_{hi},$$

а значит $\beta_i(t) \approx 0$. По мере того, как звенья руки манипуляционной системы вступают в контакт с объектом, количество избыточных степеней свободы, доступных для выполнения захвата и манипулирования, уменьшается.

Поскольку для реализации предлагаемой автором системы управления требуется получение производных траектории высокого порядка, далее решается задача генерации и фильтрации желаемой траектории в пространстве обобщенных координат шарниров робототехнической системы вида «рука+кисть».

Чтобы обеспечить определенность и ограниченность желаемой траектории в пространстве обобщенных скоростей сочленений, необходимо обеспечить существование ее производных высокого порядка. Для решения этой задачи автор использует фильтрацию траекторий с использованием функции насыщения:

$$\dot{q}_d(t) \triangleq f_{sat}\left(J_n^+ U_e + (I_n - J_n^+ J_n) U_m\right),$$

где $f_{sat}(\cdot) \in \mathbb{R}^n$ – вектор, составленный из значений функции насыщения, то есть $f_{sat}(\xi) = [f_{sat}(\xi_1) \ f_{sat}(\xi_2) \ \dots \ f_{sat}(\xi_n)]^T$ для $\forall \xi = [\xi_1 \ \xi_2 \ \dots \ \xi_n]^T \in \mathbb{R}^n$,

$f_{sat}(\xi_i) \in \mathbb{R}$ $\forall i = 1, \dots, n$ – функция насыщения:

$$f_{sat}(\xi_i) = \begin{cases} -\xi_{\min}, & \xi_i \leq -\xi_{\min} \\ \xi_i, & -\xi_{\min} < \xi_i < \xi_{\max} \\ \xi_{\max}, & \xi_i \geq \xi_{\max} \end{cases}$$

$\xi_{\min}, \xi_{\max} \in \mathbb{R}^+$ – некоторые постоянные. Для обеспечения определенности производных $q_d(t)$ высоких порядков представим фильтрующую функцию в виде:

$$W_{qd}(s) \triangleq \frac{1}{\left(\frac{s}{T_1} + 1\right)\left(\frac{s}{T_2} + 1\right)^3} f_{sat}\left(J_n^+ U_e + (I_n - J_n^+ J_n) U_m\right), \quad (8)$$

где $T_1 \in \mathbb{R}^+$ – постоянная, близкая к нулю, $T_2 \in \mathbb{R}^+$ – постоянная, $T_2 \gg 0$. Таким образом, существуют $q_d(t)$, $\dot{q}_d(t)$, $\ddot{q}_d(t)$, $\dddot{q}_d(t)$, $\ddot{\ddot{q}}_d(t)$.

В конце третьей главы автор приводит способ управления манипуляционной системой «рука+кисть» с асимптотическим отслеживанием выполнения желаемой траектории в пространстве обобщенных координат.

Поскольку динамическая модель манипуляционной системы «рука + кисть» представляет собой нелинейную неопределенную систему с несколькими входами и выходами, для непрерывного асимптотического слежения за выполнением желаемой траектории автор использует метод VFC (Velocity Field Control), согласно которому задача управления $q(t) \rightarrow q_d(t)$ при $t \rightarrow \infty$ может быть решена, если обеспечить следующий закон управления:

$$\mu(t) \triangleq (K_s + I_n) \left(e_2(t) - e_2(t_0) + \gamma_2 \int_{t_0}^t e_2(\mu) d\mu \right) + \int_{t_0}^t [\Gamma \operatorname{sgn}(e_2(\mu))] d\mu, \quad (9)$$

где $\mu(t) \in \mathbb{R}^n$ – вектор моментов, развивающихся приводами сочленений, $K_s, \Gamma \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – положительные диагональные матрицы усиления, $\operatorname{sgn}(\cdot) \in \mathbb{R}^n$ – вектор, составленный из значений функции индикации знака $\operatorname{sgn}(\xi) = [\operatorname{sgn}(\xi_1) \operatorname{sgn}(\xi_2) \dots \operatorname{sgn}(\xi_n)]^T$ для $\forall \xi = [\xi_1 \ \xi_2 \ \dots \ \xi_n]^T \in \mathbb{R}^n$.

Метод VFC предполагает использование штрафов, тем больших, чем дальше кисть находится от желаемого контура. Например, когда захватываемый объект имеет круглую форму, метод VFC генерирует желаемую траекторию, которая заставляет кисть заворачиваться внутрь, в направлении и вокруг поверхности объекта, как показано на Рис. 6.

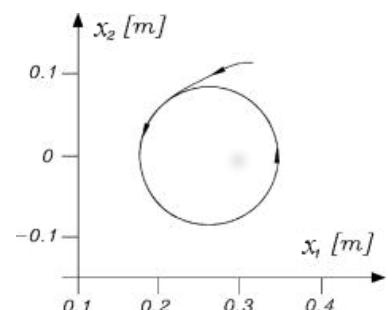


Рис. 6

Таким образом, фильтр, определяемый выражением (8), производит фильтрацию траектории (5), в свою очередь, выход фильтра используется в качестве желаемой траектории движения в пространстве обобщенных координат для контроллера, реализующего закон управления на основе VFC (9). Закон управления, представленный в (9), обеспечивает асимптотическую сходимость ошибки отслеживания, то есть, в частности, $\|e_1(t)\| \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Четвертая глава посвящена компьютерному моделированию разработанной системы управления робототехнической системой, состоящей из МР и ЗУ, а также экспериментальным исследованиям предложенной системы управления при выполнении захвата в автоматическом режиме.

В экспериментах было использовано следующее оборудование: промышленный робот Kawasaki FS20N, двухпалое захватное устройство Schunk WSG50, силомоментный датчик, датчик системы технического зрения со структурной подсветкой Intel RealSense, персональный компьютер с программным обеспечением, реализующим разработанные алгоритмы.

За основу при разработке программного обеспечения для проведения моделирования и экспериментальных исследований была принята модульная структура с распределением функций, что позволило согласованно передавать от персонального компьютера сигналы управления МР и ЗУ через TCP-соединение.

Поскольку захват в системе «рука+кисть+объект» может обеспечить желаемые свойства захвата в том случае, когда эти свойства не обеспечиваются в системе «кисть+объект», автор посчитал целесообразным рассмотреть и количественно оценить качество захватов в системе «рука+кисть+объект», выполненные с использованием звеньев руки, и захватов в системе «кисть+объект». Для сравнения было проведено компьютерное моделирования нескольких захватов такими робототехническими системами.

Результаты моделирования подтвердили эффективность предложенного подхода, поскольку в общем случае захват в системе «рука+кисть+объект», выполненный с использованием звеньев руки, для робототехнических систем с недостаточным количеством степеней подвижности в ЗУ, всегда будет более удачным, поскольку будет обладать большим объемом эллипсоида возможных контактных воздействий. Кроме того, в системе «рука+кисть+объект» перемещение объекта может осуществляться за счет движения шарниров руки. В системе «кисть+объект» возможность такого движения отсутствует ввиду наличия у ЗУ только одной степени свободы.

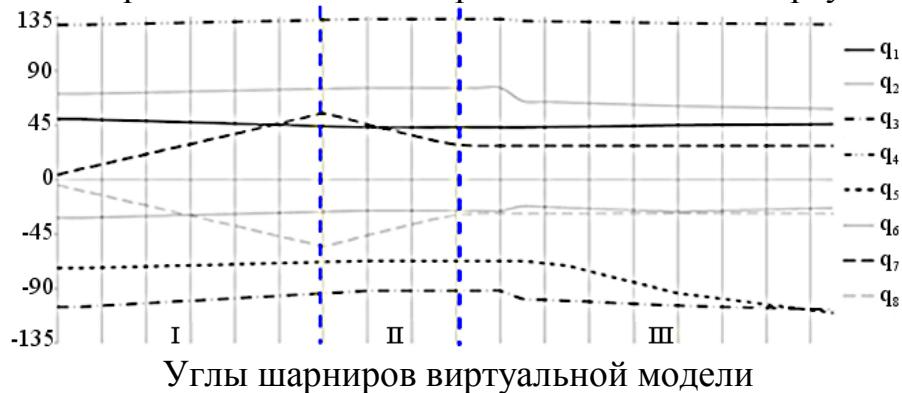
Для подтверждения достоверности результатов моделирования захвата и работоспособности метода планирования захвата для робототехнической системы «рука+кисть» была проведена серия экспериментов. Для двух различных способов захвата объекта были проведены моделирование и натурный эксперимент. Сравнение результатов моделирования и натурного эксперимента позволяет судить о точности функционирования системы управления робототехнической системой. Для моделирования и выполнения захвата в качестве объекта манипулирования был выбран жесткий футляр, имеющий форму цилиндрической поверхности с овалом в основании.

Для подтверждения работоспособности разработанной системы управления робототехнической системой, состоящей из манипуляционного робота и захватного устройства, а также для обеспечения достоверности результатов, проводилось моделирование и натурное экспериментальное исследование автоматического захвата и манипулирования объектом. Ввиду ограничений кинематической схемы и допустимых углов поворота шарниров, операция выполнялась для крупногабаритного объекта, линейные размеры которого позволяют осуществить захват с использованием звеньев руки, –

бруса, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда. Выполнялась операция силового захвата объекта манипулирования с упором объекта манипулирования в звено руки, как показано на Рис. 7 и Рис. 8.

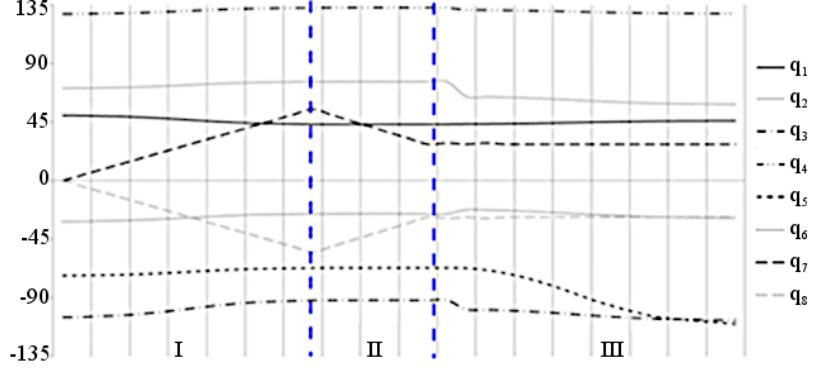
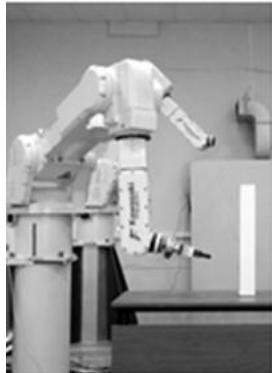


Процесс моделирования захвата габаритного объекта в виртуальной среде

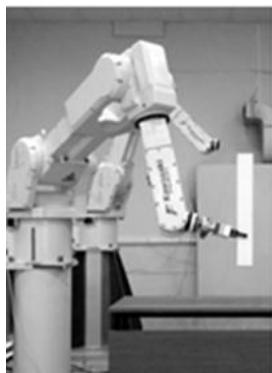


Углы шарниров виртуальной модели

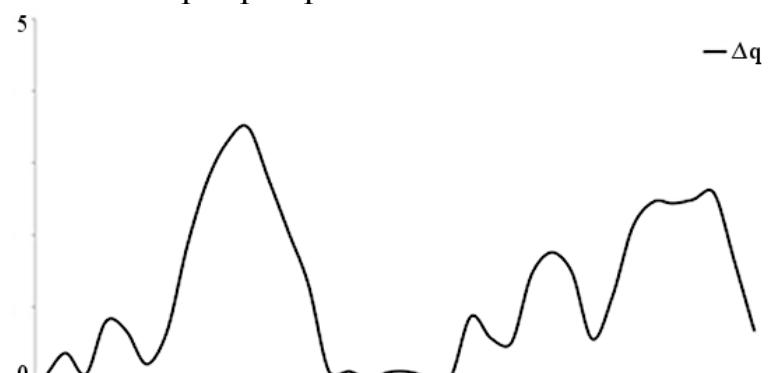
Рис. 7



Углы шарниров робототехнической системы



Процесс выполнения захвата габаритного объекта



Погрешность обобщенных координат

Рис. 8

Начальное положение и ориентация объекта относительно базовой системы координат робота были определены с помощью СТЗ и к началу операции являются известными. Конечное положение объекта было задано при помощи элементов пользовательского интерфейса. После задания начального и

конечного положения осуществлялось планирование операции, затем ее выполнение в виртуальной среде, (этап моделирования операции), после чего операция была выполнена реальной манипуляционной системой (этап натурного эксперимента). При построении траектории принималось, что объект манипулирования должен быть захвачен кистью (участок I) и поднят над поверхностью рабочего стола (участок II), после чего робототехническая система должна завершить силовой захват объекта и переместить его в конечное положение (участок III). Положение объекта относительно базовой системы координат робота и значения обобщенных координат шарниров в начале операции считаются одинаковыми для моделирования и натурного эксперимента.

Результаты проведения моделирования позволили определить точность и границы применимости разработанных методов, а также оценить качество управления движением робототехнической системы. На основе анализа полученных результатов моделирования делается вывод об обоснованности предложенного подхода. Натурное выполнение захватов позволяет судить о работоспособности метода планирования автоматического захвата, позволяющего контактировать поверхности объекта со звенями манипуляционной системы «рука+кисть». Из полученных в результате эксперимента графиков изменения во времени обобщенных координат шарниров манипуляционной системы при моделировании и при натурном выполнении операции захвата и манипулирования крупногабаритным объектом можно установить, что разработанная система управления работоспособна, а ее точность позволяет выполнять манипулирование объектами.

Основные результаты диссертации

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

- Разработана математическая модель системы «рука+кисть+объект» при захвате и переносе объекта манипулирования, на её основе выполнены аналитические исследования процессов захвата и переноса, определены условия обеспечения желаемых свойств захвата. Полученные соотношения могут служить основой для выбора не только координат сочленений кисти, но и конфигурации руки в положении, когда происходит захват объекта.
- Получены показатели качества захвата, проведен анализ особенностей их представления для систем типа «рука+кисть+объект».
- Разработаны методы планирования захвата и управления робототехнической системой, состоящей из МР и ЗУ, как робототехнической системой «рука+кисть» при выполнении автоматического захвата и манипулировании объектом, использующие заранее известную геометрическую модель объекта и не требующие наличия априорного знания желаемых контактных сил и точной динамической модели манипулятора.
- Предложена система управления, реализующая разработанные алгоритмы и обеспечивающая управление одновременным движением МР и ЗУ при автоматическом выполнении захвата и переноса объекта.
- Результаты экспериментальных исследований автоматического выполнения захвата и манипулирования объектом подтвердили работоспособность разработанных алгоритмов функционирования системы управления.

- Результаты моделирования захвата объекта робототехническими системами вида «рука+кисть» подтвердили обоснованность предложенного подхода к планированию захвата, при котором учитываются звенья МР.

Список публикаций по теме диссертации

1. Построение моделей кинематики исполнительных механизмов манипуляционных роботов с использованием блочных матриц / К.В.Бажинова [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научно-техническое издание. ЭЛ № ФС 77-53688. 2013. № 9(21). URL: <http://engjournal.ru/articles/954/954.pdf> (дата обращения 01.10.2017). (0,75 п.л./0,19 п.л.)
2. Аппаратно-программный комплекс для решения задач автоматического захвата объекта манипуляторами / К.В. Бажинова [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научно-техническое издание. ЭЛ № ФС 77-53688. 2015. № 1(37). URL: <http://engjournal.ru/articles/1361/1361.pdf> (дата обращения 01.10.2017). (0,875 п.л./0,15 п.л.)
3. Лесков А.Г., Бажинова К.В. Решение задачи управления системой «рука — кисть — объект» с учетом структуры и свойств матриц захвата // Сборник докладов VIII всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», Москва, 2015. С. 981-984. (0,25 п.л./0,13 п.л.)
4. Аппаратно-программный комплекс для исследования операций двуруких роботов, оснащенных многопальными захватными устройствами / К.В. Бажинова [и др.] // Материалы XI Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос». Звездный городок, 2015. С. 93-95. (0,188 п.л./0,03 п.л.)
5. Лесков А.Г., Бажинова К.В. Система планирования и оценки захвата объектов манипуляционным роботом // Труды Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». Санкт-Петербург, 2016. С. 291-295. (0,313 п.л./0,156 п.л.)
6. Планирование, моделирование и экспериментальное исследование типовой манипуляционной операции / К.В. Бажинова [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2016. № 4. С. 57-70. (0,875 п.л./0,146 п.л.)
7. Лесков А.Г., Бажинова К.В. Разработка алгоритмов планирования и управления движением космического манипуляционного робота при выполнении операции захвата объектов // Сборник тезисов XLI академических чтений по космонавтике, посвященных памяти С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. Москва, 2017. С. 498. (0,063 п.л./0,032 п.л.)
8. Лесков А.Г., Бажинова К.В., Селиверстова Е.В. Методы определения качества захвата объекта // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2017. № 3. С. 122-139. (1,125 п.л./0,375 п.л.)
9. Бажинова К.В., Селиверстова Е.В., Лесков А.Г. Модернизация аппаратно-программного комплекса для решения задачи автоматического захвата и перемещения объекта // Сборник докладов X всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва, 2017. С. 462-464. (0,188 п.л./0,063 п.л.)