

Селиверстова Елена Владимировна

**УПРАВЛЕНИЕ МНОГОПАЛЫМ ЗАХВАТНЫМ УСТРОЙСТВОМ  
АВТОНОМНОГО РОБОТА ПРИ ЗАХВАТЕ И МАНИПУЛИРОВАНИИ  
ДЕФОРМИРУЕМЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

Специальность 05.02.05

Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2018 г.

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: **Манько Сергей Викторович**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Проблемы управления» РТУ МИРЭА

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

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК)**

Защита состоится «11» 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.** Главное достоинство робототехнических систем – возможность выполнения манипуляционных операций, таких как, например, перемещение объектов манипулирования (ОМ), их сборка или разборка, при достаточном удалении человека от операционной зоны. Особенно актуальными являются вопросы роботизации операций при работе в экстремальных условиях – в подводном и космическом пространстве, а также при работе с опасными для человека ОМ, содержащими взрывоопасные или токсичные вещества.

На данный момент такие роботизированные операции реализуются, главным образом, за счет применения методов полуавтоматического управления, когда часть операции выполняется по заранее составленной программе, или в копирующем режиме при постоянном нахождении оператора в контуре управления роботом. Однако такие способы имеют существенные недостатки. Режим полуавтоматического управления подразумевает перемещение робота по заранее заданным в программе траекториям, что ограничивает область применения таких роботов. Главные проблемы копирующего режима – возможность потери управления при разрыве связи между роботом и пультом управления и увеличение сложности управления при наличии задержки сигнала. Эти обстоятельства могут привести к разрушению ОМ или его выпадению из захватного устройства манипулятора (ЗУМ).

Альтернативой роботам, управление которых осуществляется человеком, являются автономные манипуляционные системы, оснащенные элементами искусственного интеллекта. Работы в этом направлении ведутся как у нас в стране, так и преимущественно за рубежом. Однако к настоящему времени не удастся найти примеров полностью автономных систем, способных выполнять операции с любыми по физическим свойствам ОМ.

К основным манипуляционным задачам относится захват ОМ, который является начальным этапом большинства операций. Захват ОМ заключается в его иммобилизации внутри ЗУМ. Решение этой задачи состоит в обеспечении возможности удерживать ОМ в присутствии внешних возмущений. В общем случае один и тот же ОМ можно захватить различными способами, по-разному располагая звенья ЗУМ относительно ОМ. От выбора способа захвата зависит возможность реализации задачи захвата и выполнение операции в целом. Выбор способа захвата осуществляется на этапе планирования планировщиком захвата, входящим в состав системы управления. Планировщиком захвата также осуществляется планирование траектории перемещения звеньев ЗУМ, обеспечивающей выполнение манипуляционной операции. Решение задачи планирования захвата и последующего манипулирования требует анализа результатов моделирования ОМ и ЗУМ в процессе выполнения операции. На этапе реального выполнения манипуляционной операции система управления отрабатывает предварительно спланированную траекторию и, корректирует ее на основании информации, приходящей от датчиков.

На данный момент задача автоматического захвата решена только для случая, когда при захвате ОМ его форма не изменяется, то есть его можно рассматривать как абсолютно твердое тело. При этом крайне малое количество работ посвящено планированию захвата твердых тел с учетом возможности выполнения последующих действий, которые необходимо совершить с ОМ. Кроме того, существующие алгоритмы планирования не ставят целью минимизацию сил, прикладываемых к ОМ со стороны ЗУМ. Это приводит к усложнению алгоритмов функционирования системы управления. Минимизация этих сил позволяет избежать чрезмерной деформации или разрушения ОМ, что особенно важно при работе со взрывоопасными ОМ.

В отличие от захвата твердых тел, роботизированный захват деформируемых ОМ

является недостаточно исследованной областью, в том числе, из-за сложности моделирования контактного взаимодействия между звеньями ЗУМ и ОМ. Когда ЗУМ прикладывает усилие, чтобы захватить деформируемый ОМ, происходит расширение контактных областей и поворот нормалей к поверхности ОМ в областях контакта, что, в свою очередь, приводит к изменению значений и направлений сил контактного взаимодействия, приложенных к поверхности ОМ со стороны звеньев ЗУМ. Деформация ОМ приводит к изменению положения его центра масс, который является точкой приложения равнодействующих сил и моментов, приложенных к ОМ со стороны внешнего мира. Перечисленные факторы делают неприменимыми способы планирования и анализа свойств захвата, которые применяются для захвата твердого тела, к захвату деформируемых ОМ.

Вопросы управления ЗУМ при захвате деформируемых ОМ к настоящему времени решены для узкого круга манипуляционных задач и ограниченной номенклатуры ОМ. Однако на данный момент не существует способов планирования захвата деформируемого ОМ и, как следствие, алгоритмов управления многопалым ЗУМ для решения задач автоматического захвата и манипулирования деформируемыми ОМ произвольной формы.

**Цели и задачи.** Целью настоящей диссертации является разработка структуры и алгоритмов функционирования системы управления многопалым ЗУМ для выполнения операции автоматического захвата деформируемого ОМ произвольной формы и последующего манипулирования объектом пальцами ЗУМ с обеспечением минимизации контактных сил. Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Построение модели ОМ с известными упругими свойствами, включающей в себя модель его поверхности и положение центра масс, которые известны для недеформированного состояния и могут изменяться в процессе выполнения захвата и манипулирования ОМ.
2. Построение модели ЗУМ, включающей в себя его кинематическую схему и модели поверхностей его звеньев.
3. Разработка структуры и алгоритмов функционирования системы планирования автоматического захвата и манипулирования ОМ, включающей в себя алгоритмы выбора способа захвата с учетом возможности последующего выполнения манипулирования и планировщик движения звеньев ЗУМ при выполнении захвата и манипулирования с обеспечением минимизации контактных сил.
4. Разработка структуры и алгоритмов функционирования системы управления ЗУМ, включающей управление контактной силой при выполнении автоматического захвата и манипулирования ОМ на основе сравнения результатов планирования с оперативной информацией, приходящей от тактильных сенсоров ЗУМ.
5. Проведение экспериментальных исследований, подтверждающих правильность результатов моделирования контактного взаимодействия между захваченным ОМ и звеньями ЗУМ, а также работоспособность системы управления в целом.

**Научная новизна:**

1. Разработан новый способ моделирования контактного взаимодействия между захваченным ОМ и звеньями ЗУМ. Он включает в себя оригинальные алгоритмы определения контактных областей между поверхностями звеньев ЗУМ и ОМ, расчета сил контактного взаимодействия, а также определения смещения центра масс ОМ в процессе захвата и манипулирования.
2. Разработаны структура и алгоритмы функционирования системы планирования автоматического захвата и манипулирования ОМ многопалым ЗУМ. Система планирования содержит оригинальные алгоритмы формирования различных способов захвата ОМ, выбора способа захвата ОМ для выполнения задачи манипулирования ОМ с учетом свойств захвата, возможности последующего выполнения манипулирования

и минимизации контактных сил, алгоритм планирования движения звеньев ЗУМ при выполнении манипуляционной операции с обеспечением минимизации сил, прикладываемых к поверхности ОМ.

3. Разработаны структура и алгоритмы системы управления ЗУМ при выполнении задачи захвата и манипулирования ОМ. Система позволяет управлять контактной силой при выполнении автоматического захвата и манипулирования ОМ на основе сравнения результатов планирования с оперативной информацией, приходящей от тактильных сенсоров ЗУМ.

**Практическая значимость** настоящей диссертационной работы заключается в повышении степени автономности робототехнических систем при выполнении манипуляционных задач с потенциально опасными для жизни и здоровья человека ОМ или в опасных для человека условиях.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Способ моделирования контактного взаимодействия между захваченным ОМ и звеньями ЗУМ.
2. Алгоритм планирования автоматического захвата и манипулирования деформируемого ОМ многопалым ЗУМ.
3. Метод выбора способа захвата ОМ, позволяющий изменить его положение и ориентацию за счет движения звеньев ЗУМ.
4. Структура и алгоритм функционирования системы управления ЗУМ при выполнении захвата и манипулирования ОМ обеспечением минимизации контактных сил.

**Достоверность результатов** моделирования захвата и манипулирования ОМ подтверждена сравнением результатов компьютерного моделирования с результатами, полученными в ходе выполнения экспериментов. Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность разработанной системы управления. Моделирование и эксперименты проводились для различных по форме, массе и упругим свойствам ОМ.

**Апробация результатов.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и научных семинарах: VIII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2015); XI Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос» (Звездный городок, 2015); IX Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2016); Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», (Санкт-Петербург, 2016); XLI Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства (Москва, 2017); X Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2017); Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2017).

**Публикации.** Результаты диссертационной работы изложены в 15 научных публикациях, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК РФ [7, 8, 10, 13, 15], 7 – в тезисах докладов [3–6, 9, 11, 12].

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 190 страницы текста с 37 рисунками. Список литературы содержит 139 наименований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках мероприятия 1.2 федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (Соглашение от 26 сентября 2017 года № 14.574.21.0146, уникальный идентификатор работ RFMEFI57417X0146).

## Содержание работы

**Во введении** дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость результатов работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов и описана краткая структура диссертации.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние исследований в области решения проблемы автоматического планирования и управления движением звеньями ЗУМ при выполнении захвата и манипулировании ОМ. Существенный вклад в развитие теории захвата твердых тел внесли такие зарубежные авторы как А. Бикки, Д. Пратичезо, Дж.К. Солсбери, Э. Чинеллато, А. Морелис и многие другие. Большинство систем управления, построенных на существующей теории, позволяют манипулировать уже захваченным ОМ. Задачу определения в автоматическом режиме способа захвата ОМ решает планировщик захвата, входящий в состав системы управления. В развитии алгоритмов планирования, основанных на существующей теории, значительно продвинулись А.Т. Миллер, П.К. Аллен и Р. Дьянков при разработке планировщиков захвата твердых тел GraspIt! и OpenRAVE, которые активно применяются в современных системах управления роботов. Для выполнения автономных манипуляционных операций с деформируемыми ОМ необходимо, чтобы оценка величин контактных сил и смещения центра масс ОМ, которые возникают в процессе выполнения захвата и манипулирования, осуществлялась в среде моделирования на этапе планирования до проведения реальных действий с ОМ. Выбор начального размещения звеньев ЗУМ относительно ОМ и разработка стратегий захвата и манипулирования основаны на анализе результатов моделирования деформации ОМ в контексте рассматриваемых манипуляционных задач. Поэтому особое внимание в первой главе уделено обзору существующих способов решения задач, возникающих при моделировании захвата и манипулирования деформируемым ОМ: определения пересечений моделей поверхностей ОМ и ЗУМ, расчета сил контактного взаимодействия между ОМ и звеньями ЗУМ, определения смещения центра масс деформированного в процессе захвата и манипулирования ОМ.

**Во второй главе** представлены основные соотношения теории захвата, позволяющие формально описать взаимодействие между ОМ и многопалым ЗУМ. На их основе выведен закон управления крутящими моментами шарниров ЗУМ, обеспечивающий устойчивость системы и минимизацию контактных сил в процессе захвата и манипулирования ОМ. Для упрощения модель захвата и манипулирования рассматривается как квазистатическая, которая не учитывает динамические эффекты в системе взаимодействующих упругих тел, вызванных вязким затуханием. Поскольку ОМ является деформируемым, контакт между ОМ и звеном ЗУМ не является точечным и представляет собой контактную область, которой соответствует распределенная сила, с которой звено действует на ОМ. Далее под  $i$ -той точкой контакта понимается центр давления  $i$ -той контактной области. В зависимости от взаимного расположения точек контакта захват может быть плоским и объемным. Если точки контакта лежат в одной плоскости, то захват является плоским, иначе – объемным. На Рис. 1 изображен ОМ, захваченный многопалым ЗУМ по  $n$  контактам. В рассмотрении участвуют  $q$  шарниров ЗУМ, которые обуславливают захват. На Рис. 1 через  $\{B\}$  обозначена инерциальная система координат (СК). С центром масс ОМ связана СК  $\{O\}$ , положение которой относительно СК  $\{B\}$  задано в инерциальной СК вектором  $c_{OB}^B \in \mathbb{R}^S$ . С каждой  $i$ -той точкой контакта связана СК  $\{C_i\}$ , положение которой относительно СК  $\{B\}$  задано в инерциальной СК вектором  $c_{CiB}^B \in \mathbb{R}^S$ . С каждым  $j$ -тым шарниром, на который действует сила в  $i$ -той точке контакта,

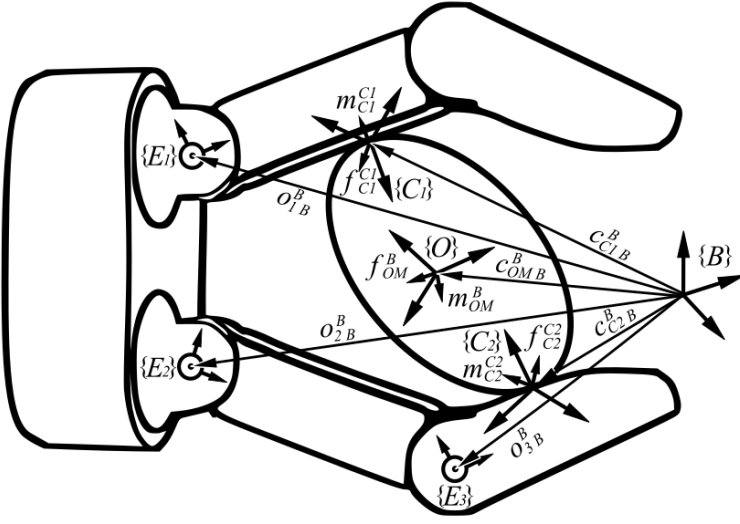


Рис. 1. Захваченный ОМ

связана СК  $\{E_j\}$ , начало которой находится в центре этого шарнира и задано в инерциальной СК вектором  $o_{jB}^B \in \mathbb{R}^s$ . Равнодействующие сил и моментов, действующие на ОМ со стороны внешнего мира, заданы векторами  $f_{OM}^B \in \mathbb{R}^s$  и  $m_{OM}^B \in \mathbb{R}^e$  в СК  $\{B\}$  и приложены к началу СК  $\{O\}$ . Контактные сила и момент, действующие на ОМ со стороны ЗУМ в  $i$ -той точке контакта, заданы векторами  $f_{Ci}^C \in \mathbb{R}^s$  и  $m_{Ci}^C \in \mathbb{R}^e$  в СК  $\{C_i\}$ .

Полная матрица захвата для  $i$ -той точки контакта  $\tilde{G}_i \in \mathbb{R}^{d \times d}$  для плоского и объемного случаев соответственно имеет вид:

$$\tilde{G}_i = \begin{bmatrix} \tau_{BCi} & Z_{s \times e} \\ Z_{e \times s} & I_{e \times e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s \times s} & Z_{s \times e} \\ S(c_{CiB}^B - c_{OMB}^B) & I_{e \times e} \end{bmatrix}, \quad \tilde{G}_i = \begin{bmatrix} \tau_{BCi} & Z_{s \times e} \\ Z_{e \times s} & \tau_{BCi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s \times s} & Z_{s \times e} \\ S(c_{CiB}^B - c_{OMB}^B) & I_{e \times e} \end{bmatrix},$$

где  $e, s$  и  $d$  – параметры, которые равны 1, 2 и 3 для плоского и 3, 3 и 6 для объемного захвата,  $\tau_{BCi} \in \mathbb{R}^{s \times s}$  – матрица поворота из СК  $\{C_i\}$  в СК  $\{B\}$ ,  $I$  – единичная матрица,  $Z$  – нулевая матрица,  $S(a) \in \mathbb{R}^{e \times s}$  – матрица векторного произведения, составленная из элементов вектора  $a = [a_x \ a_y]^T$  для плоского случая и вектора  $a = [a_x \ a_y \ a_z]^T$  для объемного случая. Для плоского и объемного случаев соответственно матрица  $S(a)$  определяется из соотношений:

$$S(a) = \begin{bmatrix} -a_y & a_x \end{bmatrix}, \quad S(a) = \begin{bmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{bmatrix}.$$

Полная матрица захвата  $\tilde{G} \in \mathbb{R}^{d \times nd}$ , составленная из матриц захвата для каждой точки контакта, имеет вид  $\tilde{G} = [\tilde{G}_1 \ \dots \ \tilde{G}_n]$ . Она соотносит блочный вектор внешнего воздействия на ОМ с блочным вектором контактного воздействия во всех точках контакта:

$$w_{OM}^B = -\tilde{G} w_C^C, \quad (1)$$

где  $w_{OM}^B \in \mathbb{R}^d$  – блочный вектор внешнего воздействия, заданный в СК  $\{B\}$ , который имеет вид  $w_{OM}^B = [f_{OM}^B \ m_{OM}^B]^T$ ,  $w_C^C \in \mathbb{R}^{nd}$  – блочный вектор контактных воздействий всех точек контакта, который имеет вид  $w_C^C = [f_{C1}^C \ m_{C1}^C \ \dots \ f_{Cn}^C \ m_{Cn}^C]^T$ .

Полная матрица Якоби для  $i$ -той точки контакта  $\tilde{J}_i \in \mathbb{R}^{d \times q}$  для плоского и объемного случаев соответственно имеет вид:

$$\tilde{J}_i = \begin{bmatrix} \tau_{CiB} & Z_{s \times e} \\ Z_{e \times s} & I_{e \times e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{i1} & \dots & D_{iq} \\ L_{i1} & \dots & L_{iq} \end{bmatrix}, \quad \tilde{J}_i = \begin{bmatrix} \tau_{CiB} & Z_{s \times s} \\ Z_{s \times s} & \tau_{CiB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{i1} & \dots & D_{iq} \\ L_{i1} & \dots & L_{iq} \end{bmatrix},$$

где  $\tau_{CiB} \in \mathbb{R}^{s \times s}$  – матрица поворота из СК  $\{B\}$  в СК  $\{C_i\}$ ,  $D_{ij} \in \mathbb{R}^{s \times 1}$  и  $L_{ij} \in \mathbb{R}^{e \times 1}$  – матрицы, которые зависят от кинематической схемы ЗУМ. Если  $j$ -тый шарнир призматический или вращательный, то  $D_{ij} = z_j^B$ ,  $L_{ij} = Z_{e \times 1}$  или  $D_{ij} = S(c_{CiB}^B - o_{jB}^B) z_j^{B'}$ ,  $L_{ij} = z_j^{B'}$  соответственно, где  $z_j^B \in \mathbb{R}^s$  – ось  $j$ -того шарнира, выраженная в СК  $\{B\}$ , вектор  $z_j^{B'} = z_j^B$  для объемного случая и  $z_j^{B'} = 1$  для плоского случая.

Полная матрица Якоби  $\tilde{J} \in \mathbb{R}^{nd \times q}$ , составленная из матриц Якоби для каждой точки контакта, имеет вид  $\tilde{J} = [\tilde{J}_1 \ \dots \ \tilde{J}_n]^T$ . Она соотносит вектор крутящих моментов шарниров ЗУМ с блочным вектором контактных воздействий:

$$\tau = \tilde{J}^T w_C^C, \quad (2)$$

где  $\tau \in \mathbb{R}^q$  – вектор крутящих моментов шарниров ЗУМ, имеющий вид  $\tau = [\tau_1 \ \dots \ \tau_q]^T$ .

Из соотношений (1), (2) и структур матрицы захвата и матрицы Якоби следует, что силы и моменты от звена ЗУМ могут быть переданы ОМ по всем направлениям. Однако в случае, когда, например, поверхности звена и ОМ являются гладкими и контактная поверхность мала, то есть силами и моментами трения можно пренебречь, через контакт возможна передача только нормальной составляющей контактной силы. Для описания компонентов сил и моментов, которые в реальности могут передаваться между двумя телами через контакт, используются упрощенные модели контакта, введенные Дж.К. Солсбери – при моделировании захвата контактная модель  $i$ -той контактной точки задается с помощью *матрицы выбора для  $i$ -той точки контактной*  $H_i \in \mathbb{R}^{d \times d}$ , которая играет роль «маски», исключающей из рассмотрения компоненты сил и моментов, которые не могут быть переданы между ОМ и звеном ЗУМ через контакт. Матрица выбора не учитывает фрикционное контактное ограничение, которое налагается моделью трения. В диссертационной работе в качестве модели контакта рассматривается модель точечного контакта с трением. Физически эта модель соответствует случаю, когда поверхности взаимодействующих тел не являются гладкими и в системе присутствуют силы трения, но контактная поверхность мала, и поэтому моментами трения можно пренебречь. Матрица выбора для  $i$ -той контактной точки, описанной моделью точечного контакта с трением, имеет вид:

$$H_i = \begin{bmatrix} I_{s \times s} & Z_{s \times e} \\ Z_{e \times s} & Z_{e \times e} \end{bmatrix}.$$

*Матрица выбора для всех точек контакта*  $H \in \mathbb{R}^{nd \times nd}$  имеет вид  $H = \text{diag}[H_1 \dots H_n]$ . С учетом ограничений, накладываемых матрицей выбора, *матрица захвата*  $G \in \mathbb{R}^{d \times nd}$  и *матрица Якоби*  $J \in \mathbb{R}^{nd \times q}$  определяются из соотношений  $G = \tilde{G}H$  и  $J = H^T \tilde{J}$ . Выражения (1) и (2) окончательно принимают вид:

$$w_{OM}^B = -Gw_C^C, \quad (3)$$

$$\tau = J^T w_C^C. \quad (4)$$

Одно и то же внешнее воздействие может быть компенсировано различными контактными воздействиями. Решение неоднородной системы, заданной в матричной форме (3), является решением задачи определения *желаемого контактного воздействия*, которое деформирует ОМ в меньшей степени, но исключает выпадение ОМ из ЗУМ:

$$w_C^C = -G^+ w_{OM}^B + (I_{nd \times nd} - G^+ G) y_{nd \times 1},$$

где  $-G^+ w_{OM}^B$  и  $(I_{nd \times nd} - G^+ G) y_{nd \times 1}$  – частное решение и общее решение соответствующего однородного уравнения,  $G^+ \in \mathbb{R}^{nd \times d}$  – псевдообратная к матрице захвата,  $y$  – вектор коэффициентов, параметризующих решение однородного уравнения, такой, что для любого  $y$  контактное воздействие уравновешивает внешнее воздействие. С частным решением отождествляются внешние контактные воздействия, которые обеспечивают равновесное состояние системы под действием внешнего воздействия, приложенного к ОМ. С решением однородного уравнения отождествляются внутренние контактные воздействия, которые не оказывают прямого влияния на внешнее воздействие, однако играют важную роль в исключении проскальзывания, а значит устойчивости системы в целом. Решение задачи определения желаемого контактного воздействия существует для любого  $w_{OM}^B$  в том случае, если  $G$  является полноранговой по строкам.

В диссертационной работе показано, что матрица  $G^+$  не учитывает упругие свойства контакта и не обладает свойством инвариантности относительно ненулевых линейных преобразований, связанных, например, с изменением систем отсчета или единиц измерения. Поэтому в работе предложено общее решение матричного уравнения (3) отыскивать в виде:



$$w_C^C = -G_K^H w_{OM}^B + (I_{nd \times nd} - G_K^H G) K J y_{q \times 1}, \quad (5)$$

где  $K \in \mathbb{R}^{nd \times nd}$  – матрица жесткости,  $G_K^H \in \mathbb{R}^{nd \times d}$  –  $K$ -взвешенная правая обратная к матрице  $G$ , которая определяется выражением  $G_K^H = K G^T (G K G^T)^{-1}$ . В диссертационной работе показано, что матрица  $G_K^H$  инвариантна, имеет физическую интерпретацию и обеспечивает минимизацию энергии упругости, а значит и минимизацию деформации ОМ.

Для определения вектора  $y$  решается задача нелинейного программирования с ограничениями-неравенствами методом Лагранжа. Суть задачи заключается в нахождении вектора  $\hat{y}$  такого, что значение целевой функции стоимости  $V(\hat{y}, w_{OM}^B)$  минимально, а значение функции ограничений  $\sigma(\hat{y})$  меньше или равно нулю.

Функция ограничений обеспечивает предотвращение проскальзывания:

$$\sigma_{i,j}(y) = \alpha_{i,j} f_{Ci}^{CiT} n_{Ci}^{Ci} + \beta_{i,j} \| f_{Ci}^{Ci} - n_{Ci}^{Ci} f_{Ci}^{CiT} n_{Ci}^{Ci} \| + \gamma_{i,j} \leq -\delta, \quad j=1,2,$$

где  $f_{Ci}^{Ci} = (I - G_K^H G) K J y$  – контактная сила в  $i$ -той точке контакта,  $n_{Ci}^{Ci}$  – единичный вектор, нормальный к поверхности ОМ в  $i$ -той точке контакта, заданный в СК  $\{C_i\}$ ,  $\delta$  – малый положительный коэффициент запаса. В последнем выражении  $j=1$  соответствует ограничение по трению, для которого  $\alpha_{i,1} = -\alpha_i$ ,  $\beta_{i,1} = 1$ ,  $\gamma_{i,1} = 0$ ;  $j=2$  соответствует ограничение по максимальному значению силы, для которого  $\alpha_{i,2} = 1$ ,  $\beta_{i,2} = 0$ ,  $\gamma_{i,2} = -f_{Ci \max}^{Ci}$ , где  $\alpha_i$  – коэффициент трения в  $i$ -той точке контакта,  $f_{Ci \max}^{Ci}$  – ограничение на величину максимального контактного воздействия.

Функция стоимости обеспечивает минимизацию контактного воздействия, а значит и деформацию ОМ:

$$V(y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 \sigma_{i,j}(y).$$

Решение неоднородной системы, заданной в матричной форме (4), является решением задачи управления моментами шарниров ЗУМ, которые реализуют желаемое контактное воздействие. Решение задачи управления моментами шарниров ЗУМ существует для любого  $w_C^C$  в том случае, если  $J$  является полноранговой по столбцам. С учетом (4) и (5) закон управления крутящими моментами шарниров ЗУМ представляется в виде:

$$\tau(t) = -J^T G_K^H w_{OM}^B(t) + J^T (I - G_K^H G) K J y(t). \quad (6)$$

Полагается, что закон изменения внешнего воздействия известен. В диссертационной работе в качестве внешнего воздействия рассматривается сила тяжести ОМ, которая не изменяет свою величину, но изменяет точку приложения, поскольку положение центра масс ОМ изменяется из-за деформации поверхности ОМ в процессе захвата и манипулирования.

В общем случае существует множество способов захватить ОМ. Поэтому встает вопрос о выборе наиболее подходящего захвата. В теории захвата выбор осуществляется на основании сравнения количественной оценки параметров, связанных со свойствами захвата. Поскольку предложенный закон управления моментами шарниров ЗУМ при реальном выполнении манипуляционной задачи предусматривает коррекцию углов шарниров, при выборе способа захвата следует учитывать удаленность углов шарниров от предельных значений в течение всего процесса выполнения манипуляционной операции. Аналитически такой критерий качества описывается следующим образом:

$$Q = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^q \left( \frac{q_{ji} - (q_{\max j} - q_{\min j}) / 2}{(q_{\max j} - q_{\min j}) t} \right)^2, \quad (7)$$

где  $t$  – количество точек траектории,  $q_{ji}$  – значение угла  $j$ -того шарнира в  $i$ -той точке траектории,  $q_{\max j}$  и  $q_{\min j}$  – верхний и нижний предел диапазона значений уг-

лов  $j$ -того шарнира ЗУМ. Чем меньше этот параметр, тем способ захвата лучше.

На Рис. 2 приведена структура системы управления ЗУМ Schunk SDH2 при захвате и манипулировании ОМ. Конструктивно в ЗУМ не предусмотрено управление по моментам, реализовано управление только по положению шарниров. Поэтому с целью реализации управления выполняется коррекция обобщенных координат шарниров, которая осуществляется на основе анализа величин контактных сил. В четвертой главе приводится сравнение значений моментов шарниров ЗУМ, полученных в процессе планирования по (6) и рассчитанных по значениям контактных сил и точкам их приложения, полученных в процессе реального выполнения операции. Сравнение проводится для демонстрации работоспособности закона управления крутящими моментами шарниров ЗУМ.

Вначале осуществляется планирование захвата и манипулирования ОМ, которое выполняется путем моделирования. Первый этап планирования – алгоритм формирования вариантов начального размещения звеньев ЗУМ относительно ОМ – гипотез захвата. Результат работы этого алгоритма – набор положений и ориентаций ЗУМ относительно ОМ. Для каждой гипотезы осуществляется планирование захватывания, результатом которого являются конфигурация ЗУМ в захватном положении, то есть положение его звеньев относительно ОМ.

На каждом шаге моделирования выполняется алгоритм определения пересечений между полигональными моделями звеньев ЗУМ и ОМ, входными параметрами которого являются полигональная модель ОМ, его положение и ориентация в СК  $\{B\}$ , полигональные модели звеньев ЗУМ, их положение и ориентация в СК  $\{B\}$ , которые определяются путем решения прямой кинематической задачи (ПКЗ). На некотором шаге моделирования поверхности ОМ и звеньев ЗУМ начинают пересекаться. Результат работы алгоритма – координаты вершин полигональных моделей ОМ и звена, входящие в область контакта, и соответствующие им глубины проникновений.

Затем выполняется алгоритм расчета сил контактного взаимодействия между звеньями ЗУМ и ОМ. Проникновение, которое было определено в результате работы алгоритма определения пересечений, является условным и в действительности отсутствует. Для устранения условного проникновения, полученного в результате моделирования, решается задача определения локальной деформации ОМ и звена ЗУМ, как если бы они прикоснулись без пересечения, и сил, вызванных этой деформацией. Результат работы алгоритма – координаты точек контактной поверхности, которые учувствуют в определении центра масс деформированного ОМ, и соответствующие им контактные силы. По этим параметрам для каждой контактной области рассчитывается равнодействующая контактная сила  $f_{Ci}^{Ci}$ . Если на текущем шаге моделирования величина контактной силы хотя бы в одной области контакта превысила допустимое значение, гипотеза исключается из дальнейшего рассмотрения.

После этого выполняется алгоритм определения центра масс деформированного ОМ. Результат работы этого алгоритма является входным параметром алгоритма проверки устойчивости и равновесия системы.

Затем выполняется алгоритм проверки устойчивости и равновесия системы. Для этого рассчитываются матрица захвата, которая должна быть полноранговой по строкам, и матрица Якоби, которая должна быть полноранговой по столбцам. Если эти условия не выполняются, гипотеза исключается из дальнейшего рассмотрения. Далее определяется желаемое контактное воздействие (5) для рассматриваемой гипотезы захвата, которое обеспечивает противодействие внешнему воздействию и исключает проскальзывание в контактных областях. Проекции  $f_{Cix\text{жс}}^{Ci}$ ,  $f_{Ciy\text{жс}}^{Ci}$ ,  $f_{Ciz\text{жс}}^{Ci}$  векторов желаемых контактных сил сравниваются с соответствующими проекциями

$f_{Cix}^{Ci}$ ,  $f_{Ciy}^{Ci}$ ,  $f_{Ciz}^{Ci}$  векторов контактных сил, полученных в результате моделирования. Если выполняются условия

$$f_{Cix}^{Ci} \geq f_{Cixж}^{Ci}, f_{Ciy}^{Ci} \geq f_{Ciyж}^{Ci}, f_{Ciz}^{Ci} \geq f_{Cizж}^{Ci}, \quad (8)$$

захват является устойчивым, система находится в равновесии, и гипотеза захвата рассматривается в контексте последующей манипуляционной операции. Иначе на следующем шаге моделирования звенья смещаются дальше по направлению к ОМ.

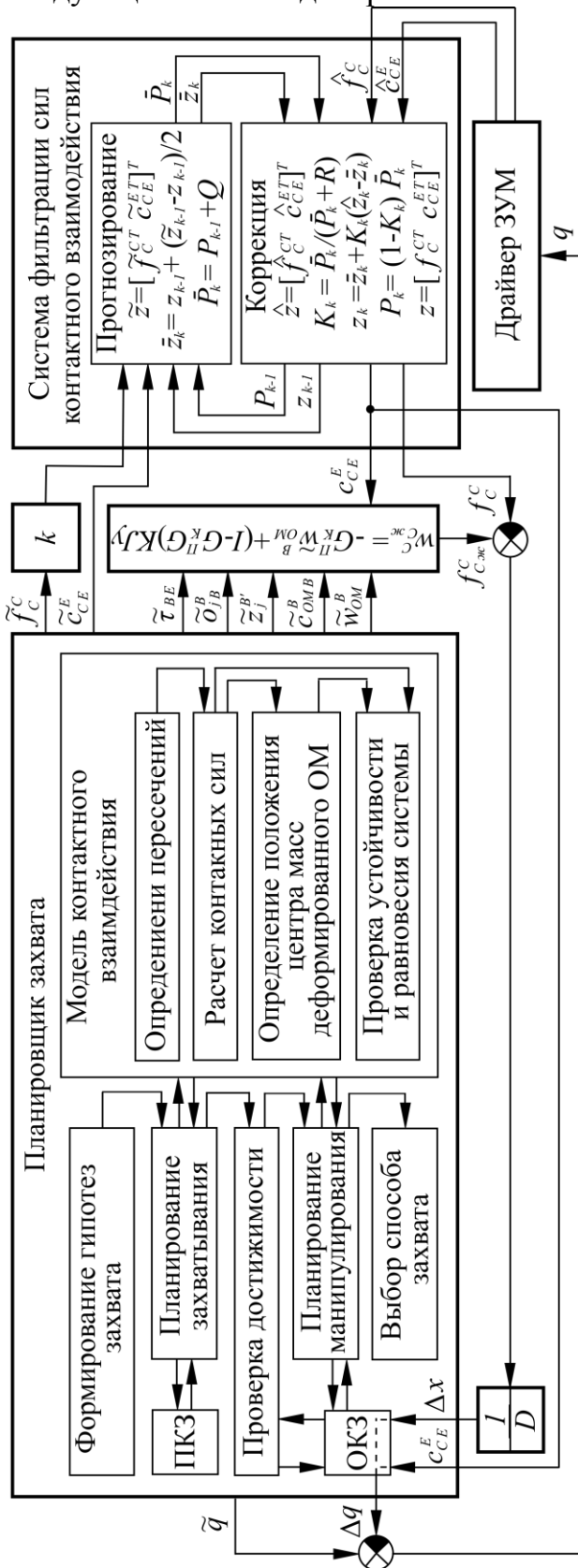


Рис. 2. Структура системы управления ЗУМ при захвате и манипулировании ОМ

Для проверки достижимости желаемого положения ОМ, то есть проверки возможности выполнения последующей манипуляционной задачи, решается обратная кинематическая задача (ОКЗ) для пальцев ЗУМ, конфигурация которого должна обеспечить желаемое положение и ориентацию ОМ в предположении, что точки контакта на звеньях ЗУМ не изменяют свое положение. Если решение обратной кинематической задачи не существует, гипотеза исключается из дальнейшего рассмотрения.

Далее выполняется алгоритм планирования движения шарниров ЗУМ для перемещения ОМ. Траектория ОМ полагается линейной. Она разбивается на заданное число шагов. Для каждого промежуточного положения ОМ путем решения ОКЗ определяется предварительная конфигурация ЗУМ в предположении, что точки контакта на звеньях ЗУМ не изменяют свое положение. Для каждого промежуточного положения ОМ определяются силы контактного воздействия, а также осуществляется проверка устойчивости и равновесия системы описанным выше способом. На основании этой проверки производится коррекция значений обобщенных координат шарниров ЗУМ следующим образом. Если не выполняется хотя бы одно из условий (8), значение обобщенной координаты шарнира, к которому прикреплено звено с рассматриваемой контактной областью, изменяется на заданную малую величину таким образом, чтобы переместить это звено ближе к ОМ. Если все условия (8) выполняются, но модуль контактной силы, полученной в результате моделирования, превосходит модуль желаемой контактной силы, значение обобщенной координаты шарнира изменяется на заданную малую величину таким образом, чтобы переместить это звено дальше от ОМ.

Затем выполняется алгоритм выбора гипотезы захвата. Выбираются несколько гипотез, которым соответствуют наименьшие максимальные значения контактных сил при моделировании захвата и манипулирования. Среди них выбирается гипотеза, которая является лучшей по критерию (7). На этом работа планировщика захвата завершается.

На этапе реального выполнения захвата и манипулирования ЗУМ в состоянии «ЗУМ открыто» устанавливается таким образом, чтобы его положение и ориентация относительно ОМ соответствовала выбранной гипотезе захвата. Затем ЗУМ обрабатывает спланированную траекторию захвата ОМ. После того, как тактильные сенсоры, расположенные на звеньях ЗУМ зафиксировали контакт, начинает работать система фильтрации контактных сил, основанная на упрощенной модели фильтра Кальмана. Ввиду того, что датчики ЗУМ фиксируют только значения контактных сил, направление каждой из них полагается совпадающей с направлением соответствующей силы контактного взаимодействия, полученной на этапе планирования.

На вход подсистемы прогнозирования подаются блочный вектор спланированных сил контактного взаимодействия  $\tilde{f}_C^C$ , заданный в СК соответствующих точек контакта и умноженный на коэффициент коррекции  $k$ , и блочный вектор точек приложения этих сил  $\tilde{c}_{CE}^C$ , заданный в СК соответствующих звеньев ЗУМ. Значение  $k$  определяется эмпирически для каждого ОМ до выполнения манипуляционной операции путем сравнения модулей спланированных контактных сил со значениями сил, полученных от тактильных сенсоров, для произвольного способа захвата. Блочные векторы  $\tilde{f}_C^C$  и  $\tilde{c}_{CE}^C$  объединяются в блочный вектор  $\tilde{z}$  спланированных значений. В подсистеме прогнозирования:  $\tilde{z}_k$  – блочный вектор спрогнозированных значений,  $\tilde{z}_{k-1}$  – блочный вектор спланированных значений на предыдущем шаге работы системы управления,  $z_{k-1}$  – блочный вектор скорректированных значений на предыдущем шаге работы системы управления,  $\bar{P}_k$  – спрогнозированная величина на ошибки,  $P_{k-1}$  – скорректированная величина ошибки на предыдущем шаге работы системы управления,  $Q$  – шум процесса.

На вход подсистемы коррекции подаются блочный вектор реальных сил контактного взаимодействия  $\hat{f}_C^C$ , заданный в СК соответствующих точек контакта, и блочный вектор точек приложения этих сил  $\hat{c}_{CE}^C$ , заданный в СК соответствующих звеньев ЗУМ. Блочные векторы  $\hat{f}_C^C$  и  $\hat{c}_{CE}^C$  объединяются в блочный вектор  $\hat{z}$  реальных значений. В подсистеме коррекции:  $K_k$  – коэффициент усиления фильтра,  $R$  – шум измерений,  $z_k$  – блочный вектор скорректированных значений,  $P_k$  – скорректированная величина ошибки.  $P_k$  и  $z_k$  передаются в подсистему прогнозирования для расчетов на следующем шаге работы системы управления.

Для текущей точки траектории рассчитывается матрица захвата  $G$  и матрица Якоби  $J$ . С учетом вектора внешних воздействия  $\tilde{w}_{OM}^B$  для текущей точки траектории, приходящей от планировщика захвата, определяется желаемое контактное воздействие  $w_{Cж}^C$ , обеспечивающее устойчивый захват. По разности между желаемыми  $f_{Cж}^C$  и скорректированными  $f_C^C$  силами с учетом жесткости контакта  $D$  рассчитывается блочный вектор  $\Delta x$  смещений звеньев ЗУМ в точках контакта, обеспечивающий желаемые контактные силы. Значение  $D$  определяется эмпирически для каждого ОМ до выполнения манипуляционной операции. По блочному вектору смещений  $\Delta x$  и скорректированным положениям точек контактов  $c_{CE}^C$ , приходящим от системы фильтрации сил контактного взаимодействия, путем решения ОКЗ определяется величина рассогласования  $\Delta q$  между текущими и желаемыми обобщенными координатами ЗУМ. Величина этого рассогласования учитывается на следующем шаге работы системы управления.

**В третьей главе** содержится описание математических моделей деформируемого ОМ и многопалого ЗУМ, а также алгоритмов планировщика захвата и мани-

пулирования деформируемым ОМ. Разработанная среда моделирования является приложением мета-операционной системы Robot Operating System (ROS). Разработанные модели деформируемого ОМ и звеньев ЗУМ основаны на методе точечной дискретизации. Принято допущение, что в контактных областях поверхности звеньев ЗУМ и ОМ представляют собой линейно деформируемые полупространства. ОМ полагается изотропным, положение его центра масса в недеформированном состоянии и упругие свойства ОМ и звеньев ЗУМ считаются известными. Поверхности ОМ и звеньев ЗУМ в недеформированном состоянии заданы полигональными моделями. Разработанная математическая модель ЗУМ включает в себя его кинематическую схему и модели звеньев, которые изменяют форму поверхности из-за деформации, возникающей в процессе контакта с ОМ. Она позволяет моделировать ЗУМ с различными кинематическими цепями и использовать инструменты ROS для решения прямой и обратной задач кинематики для пальцев ЗУМ.

*Формирование гипотез захвата и планирование захватывания.* Вокруг полигональной модели ОМ строится ограничивающий объем в виде многогранника, получаемого путем уменьшения количества вершин полигональной модели ОМ. На Рис. 3, а изображены полигональная модель ОМ и полученный для нее многогранник. В геометрических центрах полигонов многогранника восстанавливаются нормали к соответствующим полигонам. Вдоль нормалей откладываются точки, удаленные от центров полигонов на заданное пользователем расстояние, которое зависит от габаритов ЗУМ – это расстояние должно быть больше высоты базы ЗУМ, но меньше длины ЗУМ. С этими точками связываются СК гипотез (Рис. 3, б). Ориентация СК гипотез выбирается таким образом, чтобы при совмещении СК базы ЗУМ с СК гипотезы ЗУМ было направлено вдоль вектора нормали и пальцами ориентировано в сторону ОМ. Затем для каждой гипотезы захвата осуществляется планирование захватывания. Последовательно в каждую СК гипотез устанавливается модель ЗУМ в состоянии «ЗУМ открыто» (Рис. 3, в). Планирование захватывания осуществляется путем пошагового изменения обобщенных координат шарниров для всех возможных комбинаций пальцев ЗУМ для перевода его в состояние «ЗУМ закрыто» (Рис. 3, г), что обеспечивает движение звеньев ЗУМ в направлении к ОМ. На некотором шаге поверхности ОМ и звеньев ЗУМ начинают пересекаться. Когда количество контактных областей становится больше одной, захват считается осуществленным для текущей гипотезы захвата.

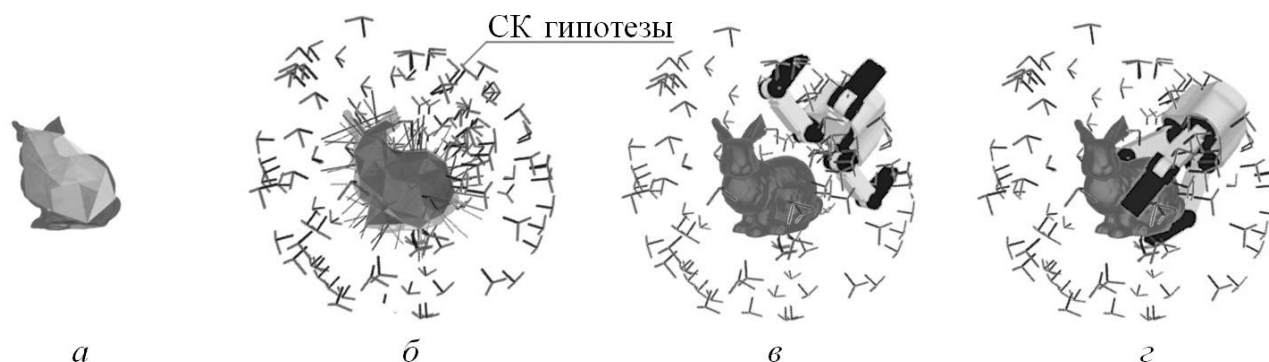


Рис. 3. Формирование гипотез захвата

*Определение пересечений полигональных моделей ОМ и звеньев ЗУМ.* Алгоритм включает в себя широкую и узкую фазы. Алгоритм широкой фазы основан на методе ограничивающих объемов с использованием ориентированных параллелепипедов (ОП) и усовершенствован за счет введения в рассмотрение областей потенциального взаимодействия (ОПВ), каждая из которых соответствует одному из ограничивающих объемов. ОПВ имеет вид параллелепипеда, расположенного внутри соответствующего ОП и ограничивающего пространство проникновения другого

ОП. ОПВ строится таким образом, что ее ребра параллельны ребрам ОП, которому она соответствует и внутри которого находится. На Рис. 4, а изображены ОПВ для ОМ и звена ЗУМ. На Рис. 4, б вершины полигональных моделей звена и ОМ, входящие в них, представлены отдельно. Введение ОПВ повышает точность широкой фазы за счет проверки наличия вершин полигональных моделей внутри соответствующих ОПВ, поскольку в процессе моделирования уменьшается число случаев, когда имеет место пересечение ограничивающих параллелепипедов, но пересечение между полигональными моделями отсутствует. Если в широкой фазе пересечение между звеном и ОМ не обнаружено, выполняется следующий шаг моделирования, на котором звено продолжает движение по направлению к ОМ. Основанием для перехода к узкой фазе служит факт обнаружения в областях потенциального взаимодействия вершин полигональных моделей поверхностей и ОМ, и звена ЗУМ. В основе алгоритма узкой фазы лежит задача поиска «ближайшего соседа» для каждой вершины полигональной модели ОМ среди вершин звена ЗУМ или звена ЗУМ среди вершин ОМ, входящих в ОПВ, с учетом направления движения звена. На Рис. 4, б точками изображены вершины полигональных моделей звена и ОМ, входящие в ОПВ, среди которых осуществляется поиск. Линиями эти вершины соединены со своими «ближайшими соседями».

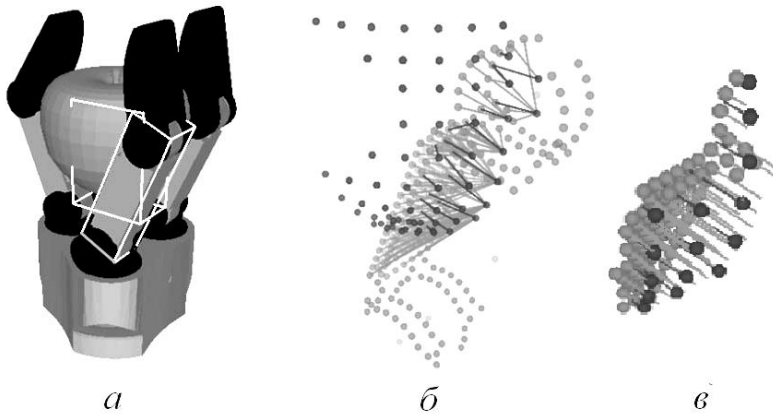


Рис 4. Определение пересечений полигональных моделей

Вершины, для которых «ближайший сосед» не найден, не входят в область контакта. Результат работы алгоритма – блочные векторы  $P$  и  $Q$  координат вершин полигональной модели ОМ и звена, входящих в область контакта (точки на Рис. 4, в), и соответствующие им блочные векторы  $\delta_P$  и  $\delta_Q$  глубин проникновений (линии на Рис. 4, в).

**Расчет контактных сил.** Для каждой контактной области вначале восстанавливаются блочные векторы поверхности контакта ОМ  $R_P = [r_{p1}^T \dots r_{pP}^T]$  и звена ЗУМ  $R_Q = [r_{q1}^T \dots r_{qQ}^T]$ . Они формируются из координат точек, полученных путем

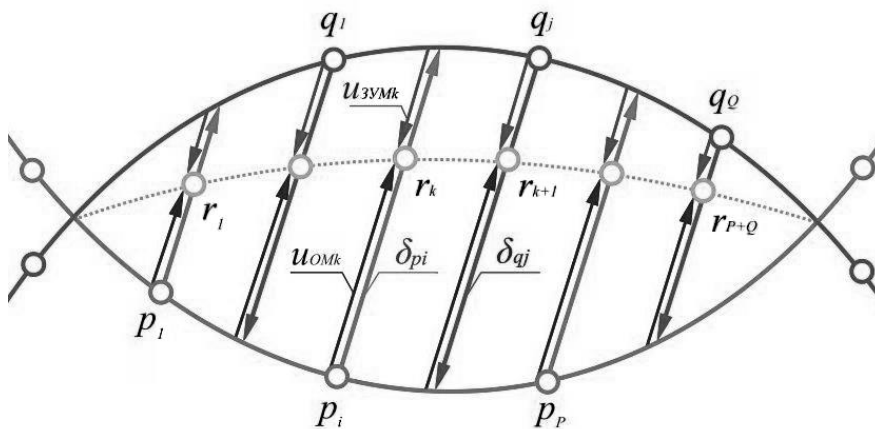


Рис.5. Определение локальной деформации

смещения вершин, содержащихся в векторах  $P$  и  $Q$ , вдоль соответствующих векторов проникновений, содержащихся в  $\delta_P$  и  $\delta_Q$  (Рис. 5). Такие смещения полагаются обратно пропорциональными модулям Юнга материалов  $E_{ЗУМ}$  и  $E_{ОМ}$ , из которых изготовлены звенья ЗУМ и ОМ:

$$R_P = P + \frac{E_{ЗУМ}}{E_{ОМ} + E_{ЗУМ}} \delta_P, \quad R_Q = Q + \frac{E_{ОМ}}{E_{ОМ} + E_{ЗУМ}} \delta_Q.$$

Поскольку контактные поверхности ОМ и звена имеют одинаковую форму, и для каждой вершины из  $R_P$  и  $R_Q$  существуют точки на поверхностях звена и ОМ, с ко-

торыми они находятся в контакте, вводится в рассмотрение блочный вектор контактной поверхности  $R = [[R_P]^T [R_Q]^T]^T = [r_1^T \dots r_{P+Q}^T]^T$ , описывающий локальную деформацию. Тогда блочные векторы смещений контактной поверхности ОМ  $u_{OM} = [u_{OM1}^T \dots u_{OMP+Q}^T]^T$  и контактной поверхности звена  $u_{ЗУМ} = [u_{ЗУМ1}^T \dots u_{ЗУМП+Q}^T]^T$  (Рис. 5) определяются из соотношений:

$$u_{OM} = [[R_P - P]^T \quad [R_Q - Q - \delta_Q]^T]^T, \quad u_{ЗУМ} = [[R_P - P - \delta_P]^T \quad [R_Q - Q]^T]^T.$$

Блочный вектор контактного воздействия  $F_{OM} = [f_{OM1}^T \dots f_{OMP+Q}^T]^T$ , составленный из векторов контактных сил, действующих на ОМ в точках, содержащихся в блочном векторе  $R$ , определяется из соотношения:

$$F_{OM} = (W_{OM} + W_{ЗУМ})^T (u_{OM} - u_{ЗУМ}),$$

где  $W_{OM}$  и  $W_{ЗУМ}$  – матрицы упругости ОМ и звена ЗУМ. Они могут быть представлены в виде блочных матриц из  $(P + Q)$  блоков, которые вычисляются по формулам:

$$w_{OMij} = \frac{G_{OM} n_{OMi} n_{OMi}^T + E_{OM} (I_{s \times s} - n_{OMi} n_{OMi}^T)}{E_{OM} G_{OM} S_i}, \quad w_{OMij} = \frac{1 - \nu_{OM}}{2\pi G_{OM} l_j} I_{s \times s},$$

$$w_{ЗУМij} = \frac{G_{ЗУМ} n_{ЗУМi} n_{ЗУМi}^T + E_{ЗУМ} (I_{s \times s} - n_{ЗУМi} n_{ЗУМi}^T)}{E_{ЗУМ} G_{ЗУМ} S_i}, \quad w_{ЗУМij} = \frac{1 - \nu_{ЗУМ}}{2\pi G_{ЗУМ} l_j} I_{s \times s},$$

где  $\nu_{OM}$ ,  $\nu_{ЗУМ}$ ,  $G_{OM}$  и  $G_{ЗУМ}$  – коэффициенты Пуассона и модули сдвига материалов, из которых изготовлены ОМ и звенья ЗУМ,  $n_{OMi}$  и  $n_{ЗУМi}$  – нормали к контактной поверхности в точках, содержащийся в  $R$ ,  $S_i$  – площадь поверхности, на которую действуют точечные силы, приложенные к вершине  $i$ ,  $l_j$  – расстояние между вершинами  $i$  и  $j$ .

*Определение центра масс деформированного ОМ.* Полигональная модель деформированного ОМ разбивается трехмерной сеткой (Рис. 6, а).

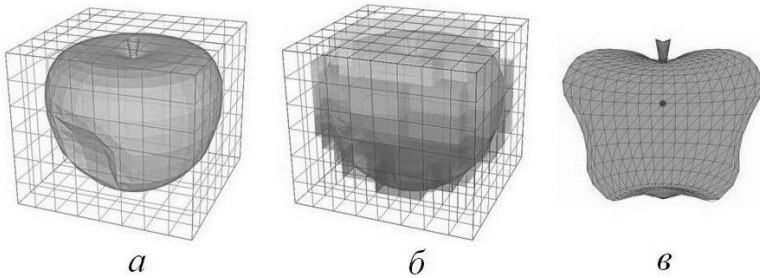


Рис 6. Определение центра масс деформированного ОМ

Затем определяются ячейки, содержащие вершины полигональной модели или находящиеся внутри полигональной модели ОМ (Рис. 6, б). Каждой ячейке ставится в соответствие весовой коэффициент, пропорциональный объему ОМ, содержащемуся в ней.

Центр масс деформированного ОМ определяется исходя из известных радиус-векторов и весовых коэффициентов каждой ячейки. На Рис. 6, в точкой отмечено положение центра масс ОМ после деформации. Ориентация трехмерной сетки, при которой одно из ее ребер параллельно вектору силы тяжести, дает возможность определения центра масс деформируемых сосудов, например, пластиковых бутылок, наполненных жидкостью, в предположении, что весом сосуда можно пренебречь. В этом случае объем ОМ будет распределяться слоями, начиная с нижнего. Уровень жидкости будет располагаться на том слое, на котором объем заполненных ячеек будет равен известному объему жидкости. Это приводит к расширению номенклатуры деформируемых ОМ, моделирование захвата и манипулирования которыми можно осуществлять предложенным способом.

**В четвертой главе** содержатся результаты моделирования и экспериментальных исследований. На Рис. 7, а представлена фотография экспериментальной установки при захвата резинового тора, на Рис. 7, б – информация, приходящая с тактильных площадок ЗУМ Schunk SDH2, полученная с использованием штатных программных средств ЗУМ, на Рис. 7, в – компьютерная модель в разработанной среде моделирования.



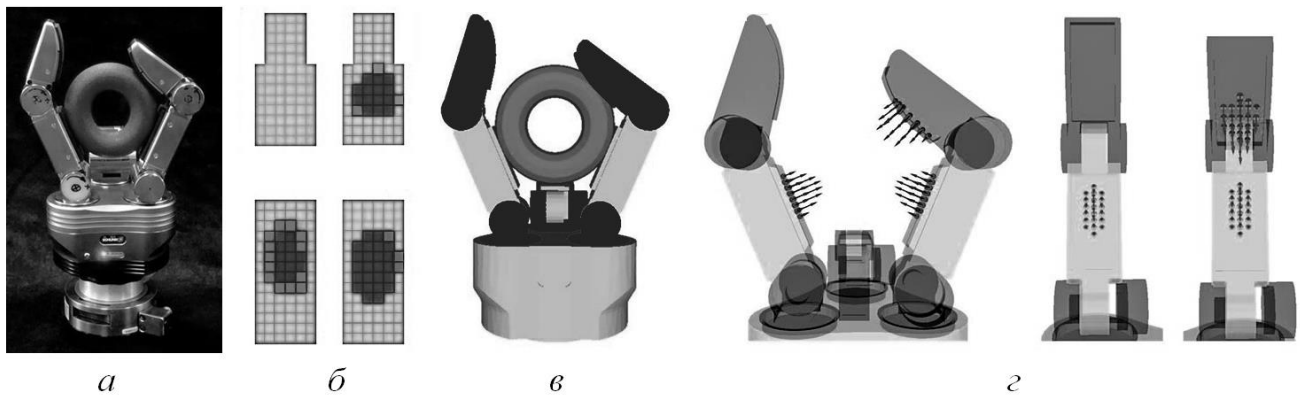


Рис. 7. Оценка результатов моделирования контактного взаимодействия при захвате ОМ

На Рис. 7, г приведены результаты работы алгоритма расчета сил контактного взаимодействия для захваченного ОМ. Точки приложения равнодействующих контактных сил совпадают с центрами давлений в областях контактов, определенных на основании информации, приходящей с тактильных площадок при реальном захвате ОМ, с точностью до размера ячеек матриц тензодатчиков. Максимальная погрешность расчета контактных сил при разных способах захвата различных по форме и физическим свойствам ОМ не превышает 30%. Точность увеличивается с увеличением точности параметров, описывающих упругие свойства ОМ, и увеличением числа полигонов моделей. Однако уровень точности полигональных моделей существенно сказывается на времени планирования. Компромиссом является введение в систему управления коэффициента коррекции  $k$  (рис. 2), который определяется эмпирически для каждого ОМ. О точности алгоритма определения смещения центра масс можно судить опосредованно на основе сравнения результатов планирования и результатов реального выполнения задачи захвата и манипулирования ОМ.

На Рис. 8, а изображены фазы выполнения манипуляционной операции с пластиковой бутылкой, наполненной жидкостью. На Рис. 8, б черной штрихпунктирной линией обозначен график изменения плановой контактной силы левого пальца ЗУМ (то есть, вычисленной при планировании), черной сплошной – график изменения реальной силы при выполнении реальной операции манипулирования ОМ. Серой штрихпунктирной линией обозначен график изменения плановой контактной силы правого пальца ЗУМ, серой сплошной – график изменения реальной контактной силы этого пальца. На Рис. 8, в серой и черной штрихпунктирными линиями обозначены графики изменения плановых углов соответственно дистального и проксимального шарниров левого пальца, серой и черной сплошными линиями соответственно – графики изменения этих углов при выполнении реальной операции манипулирования ОМ. На графике (Рис. 8, г) серой и черной штрихпунктирными линиями обозначены графики изменения плановых углов соответственно дистального и проксимального шарниров правого пальца, серой и черной сплошными линиями соответственно – графики изменения реальных углов. На графике (Рис. 8, д) черной и серой штрихпунктирными линиями обозначены графики изменения плановых моментов соответственно дистального и проксимального шарниров правого пальца, черной и серой сплошными линиями соответственно – графики изменения реальных моментов. На графике (Рис. 9, е) черной и серой штрихпунктирными линиями обозначены графики изменения плановых моментов дистального и проксимального шарниров правого пальца, черной и серой сплошными линиями соответственно – графики изменения соответствующих реальных моментов.



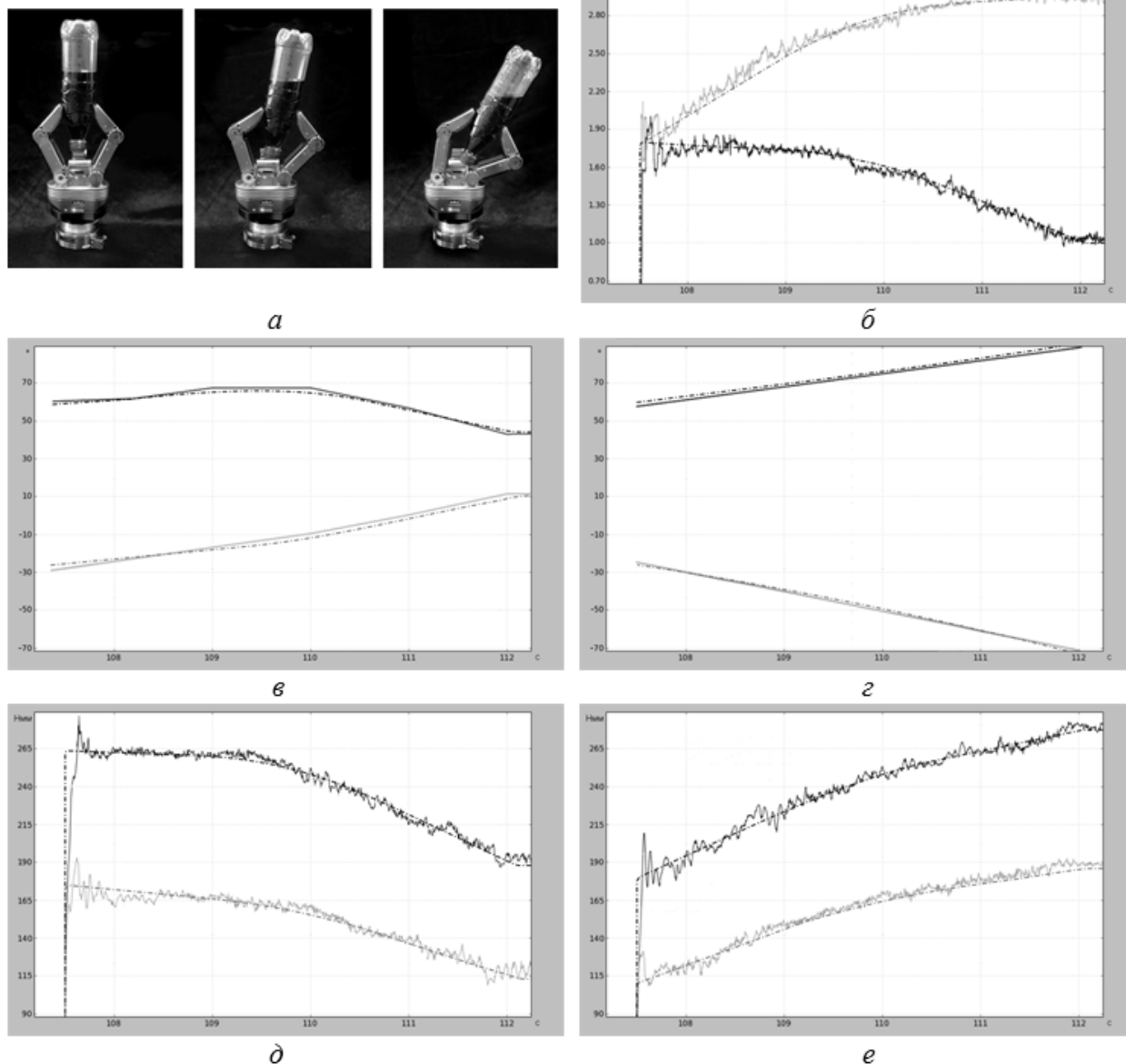


Рис. 8. Результаты экспериментальных исследований при захвате и манипулировании ОМ

Сравнение результатов планирования и реального выполнения манипуляционной операции свидетельствует о наличии коррекции в процессе реального выполнения операции. Различия результатов, полученных в результате моделирования и реального выполнения операции, связаны с неточным положением ОМ относительно звеньев ЗУМ и неточным определением центров давления контактных областей в процесс планирования, что, однако, не сказалось на успешности реального выполнения манипуляционной задачи.

При реальном выполнении операции изменения положения бутылки с жидкостью, изменение положение центра масс ОМ существенно влияет на распределение сил контактного взаимодействия между контактными областями. Поэтому, основываясь на том, что различия между графиками сил контактного взаимодействия и моментов шарниров ЗУМ при планировании и реальном выполнении незначительны, можно сделать вывод о достоверности предложенного алгоритма определения центра масс ОМ.

Таким образом, на основании сравнения результатов планирования и реального выполнения манипуляционных операций с различными по форме и упругим свойствам ОМ, можно сделать вывод о том, что результаты предложенного способа планирования захвата и манипулирования ОМ являются достоверными, а алгоритм

управления шарнирами ЗУМ при выполнении таких манипуляционных операций – работоспособным.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. Получено решение задачи определения минимального контактного воздействия. Это решение положено в основу разработанного алгоритма управления крутящими моментами шарниров ЗУМ при выполнении захвата и манипулирования ОМ. Использование  $K$ -взвешенной правой обратной к матрице захвата вместо псевдообратной к матрице захвата обеспечивает инвариантность относительно ненулевых линейных преобразований и учет упругих свойств в точках контакта.
2. Разработан способ моделирования контактного взаимодействия между захваченным ОМ и звеньями ЗУМ, включающий в себя алгоритмы определения контактных областей между поверхностями звеньев ЗУМ и ОМ, расчета сил контактного взаимодействия и определения смещения центра масс ОМ в процессе захвата и манипулирования.
3. Разработаны структура и алгоритмы функционирования системы планирования захвата и манипулирования ОМ многопалым ЗУМ. Система планирования включает в себя алгоритм формирования гипотез захвата и алгоритм выбора способа захвата ОМ с учетом возможности выполнения последующего манипулирования и минимизации контактных сил.
4. Разработаны структура и алгоритмы функционирования системы управления ЗУМ при выполнении задачи автоматического захвата и манипулирования ОМ. Система позволяет управлять контактными силами при выполнении автоматического захвата и манипулирования ОМ на основе сравнения результатов планирования с оперативной информацией, приходящей от тактильных сенсоров ЗУМ.
5. Результаты экспериментальных исследований подтвердили необходимость учета физических свойств ОМ при планировании захвата и манипулирования ОМ.
6. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие правильность результатов моделирования контактного взаимодействия между захваченным ОМ и звеньями ЗУМ.
7. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие работоспособность предложенной системы управления.

#### **Список публикаций по теме диссертации**

1. Построение моделей кинематики исполнительных механизмов манипуляционных роботов с использованием блочных матриц / Е.В. Феоктистова (Е.В. Селиверстова) [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 / Е.В. Феоктистова (Е.В. Селиверстова) [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., Феоктистова Е.В. (Селиверстова Е.В.). Алгоритм определения пересечения произвольных полигональных моделей для нахождения коллектора контакта, нормалей и глубины проникновения при планировании и моделировании захвата деформируемого объекта // Сборник докладов VIII всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва, 2015. С. 988-992. (0,313 п.л./0,156 п.л.)
4. Аппаратно-программный комплекс для исследования операций двуруких роботов,

- оснащенных многопальными захватными устройствами / Е.В. Феоктистова (Е.В. Селиверстова) [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., Селиверстова Е.В., Бажинова К.В. Определение в автоматическом режиме упругих свойств объекта манипулирования и коэффициента трения между объектом и звеньями захватного устройства // Сборник докладов IX всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва, 2016. С. 665-667. (0,188 п.л./0,063 п.л.)
  6. Лесков А.Г., Селиверстова Е.В. Расчет сил контактного взаимодействия между деформируемым объектом и звеньями захватного устройства манипулятора // Труды Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». Санкт-Петербург, 2016. С. 129-134. (0,375 п.л./0,188 п.л.)
  7. Планирование, моделирование и экспериментальное исследование типовой манипуляционной операции / Селиверстова Е.В. [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2016. № 4. С. 57-70. (0,875 п.л./0,146 п.л.)
  8. Лесков А.Г., Селиверстова Е.В. Расчет областей пересечения поверхностей захватных устройств манипуляторов и деформируемых объектов при планировании и моделировании захвата // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2016. № 6. С. 97-114. (1,125 п.л./0,563 п.л.)
  9. Лесков А.Г., Селиверстова Е.В. Планирование и управление движением звеньев захватного устройства космического манипуляционного робота при захвате деформируемого объекта // Сборник тезисов XLI академических чтений по космонавтике, посвященных памяти С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. Москва, 2017. С. 500. (0,063 п.л./0,031 п.л.)
  10. 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.)
  11. 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.)
  12. Лесков А.Г., Селиверстова Е.В. Алгоритм планирования и выбора способа захвата деформируемого объекта // Труды Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». Санкт-Петербург, 2017. С. 111-112. (0,125 п.л./0,063 п.л.)
  13. Лесков А.Г., Селиверстова Е.В. Алгоритм планирования и выбора способа захвата деформируемого объекта многопальным захватным устройством манипуляционного робота // Мехатроника, автоматизация, управление, 2017. Т. 11, № 11. С. 739-743. (0,313 п.л./0,156 п.л.)
  14. Бажинова К.В., Селиверстова Е.В. Захват объектов различной формы с использованием системы тактильного осязания // «Политехнический молодежный журнал» МГТУ им. Н.Э. Баумана Электронное научно-техническое издание. Эл № ФС 77-65907. 2018. №3(20). URL: <http://ptsj.ru/articles/266/266.pdf> (дата обращения 15.05.2018). (0,625 п.л./0,313 п.л.)
  15. Лесков А.Г., Селиверстова Е.В. Расчет сил контактного взаимодействия между деформируемым объектом и звеньями захватного устройства манипулятора // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2018. № 3. С. 72-88. (1,063 п.л./0,531 п.л.)