

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**Федеральное государственное автономное образовательное**  
**учреждение высшего образования**  
**«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**ВЫСШАЯ ШКОЛА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И**  
**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Направление: 09.04.04 – Программная инженерия

Профиль: Робототехника

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ**  
**МАНИПУЛЯТОРОМ ДЛЯ ЗАДАЧ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ**  
**МЕТОДОМ ПАЛЬПАЦИИ В СРЕДЕ ROS-GAZEBO**

Студент 2 курса

группы 11-831

«22» июня 2020 г.

Шафиков А.Р.

Научный руководитель

Профессор кафедры

интеллектуальной робототехники, PhD

«22» июня 2020 г.

Магид Е.А.

Директор Высшей школы ИТИС КФУ

канд. техн. наук

«22» июня 2020 г.

Абрамский М.М.

Казань – 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Обзор литературы .....	7
1.1 Управление ходом процедуры автономной пальпации .....	7
1.2 Управление ходом процедуры пальпации в режиме телеоперации .....	25
1.3 Получение характеристик пальпируемой поверхности.....	27
2 Теоретические аспекты автономной пальпации .....	45
2.1 Медицинские аспекты пальпации .....	45
2.2 Получение информации о геометрических свойствах поверхности .....	47
2.3 Получение информации о физических свойствах поверхности .....	50
2.4 Обход поверхности .....	52
3 Симуляция.....	55
3.1 Манипулятор .....	55
3.2 Симуляционное окружение.....	57
3.3 Симуляция мягких объектов.....	58
3.4 Симуляция переменной жёсткости .....	63
4 Автономная система пальпации .....	65
4.1 Модуль обработки данных с камеры .....	65
4.2 Модуль расчёта положений .....	67
4.3 Модуль управления манипулятором.....	67
4.4 Сбор данных .....	69
5 Результаты работы автономной системы .....	70
Заключение .....	73
Список литературы .....	77

## **ВВЕДЕНИЕ**

С каждым годом робототехника охватывает всё больше сфер человеческой жизни. Одной из таких сфер является медицина. На сегодняшний день робототехника уже применяется в таких областях медицины, как протезирование, реабилитация и хирургия [1]. Так, за 2018 год с помощью робототехнической хирургической системы Da Vinci было проведено более трёхсот пятидесяти тысяч операций в области общей хирургии и около трёхсот тысяч в областях гинекологии, урологии и оториноларингологии [2]. Несмотря на тот факт, что уровень развития робототехнических решений для множества других возможных областей медицины на сегодняшний день по сравнению с вышеупомянутой системой Da Vinci не так высок, или таковые вовсе отсутствуют, над многими из таких областей идёт активная исследовательская работа. Одной из таких областей применения робототехники является пальпация - один из основных методов клинического обследования пациентов.

В ходе пальпации в качестве источника информации, необходимой для медицинской диагностики, используются тактильные ощущения, получаемые при помощи рук [3]. Среди факторов, учитываемых при проведении процедуры, присутствуют защитная фиксация мышц, геометрическая форма, жёсткость, опухоль и другие образования [4], которые могут указывать на наличие у пациента таких заболеваний, как перитонит, атеросклероз, аппендицит, гиперспленизм, рак почек, тромбофлебит, рак поджелудочной железы, фиброаденома и множества других заболеваний [3]. Субъективный характер пальпации и большое количество опыта, необходимого для того, чтобы освоить данную процедуру [5], являются основными причинами высокой исследовательской активности в области автоматизации процедуры пальпации. Ещё одной мотивацией является развитие телемедицины, которая направлена на обеспечение доступности медицинских услуг для людей, имеющим трудности с доступом к медицинскому обслуживанию как

вследствие особенностей инфраструктуры места их проживания, так и вследствие физических ограничений, накладываемых состоянием здоровья.

Устранение вышеупомянутой субъективности путём количественной оценки свойств пальпируемых тканей и повышение точности определения пространственных характеристик обнаруженных патологий являются основной целью большинства исследований в сфере робототехнической пальпации. Исследования в данной области ведутся уже на протяжении нескольких десятилетий: ещё в 1988 году был представлен WAPRO-4 [6] - робот для автоматизированной пальпации груди, который использует четыре зонда на основе датчиков давления. Данный робот был протестирован в клинических условиях, правильно диагностировав наличие опухоли у четырнадцати из пятнадцати испытуемых. На сегодняшний день исследования в области робототехнической пальпации затрагивают также множество других проблем: зачастую в рамках одного исследования авторы предлагают решение сразу нескольких вопросов. Среди существующих направлений исследований можно выделить три основных: решение проблемы определения маршрута на исследуемой поверхности для автономной пальпации, контроль процесса для пальпации в режиме телеоперации и развитие методов получения характеристик исследуемой поверхности. Стоит также отметить, что существует множество исследований, напрямую не связанных с робототехнической пальпацией, однако исследующих те же проблемы, поэтому результаты таких исследований могут быть полезны для развития данной области.

Целью данной работы является моделирование системы автономной пальпации на основе робототехнического манипулятора, способной осуществлять пальпацию произвольной поверхности и предоставлять количественные данные о состоянии пальпируемого объекта. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- создание архитектуры автономной системы пальпации;
- создание модели манипулятора для обеспечения контакта с пальпируемой поверхностью и сбора данных о её характеристиках;
- внедрение поддержки эластичных поверхностей в симулятор Gazebo [7] для симуляции мягких тканей человека;
- программная имплементация разработанной системы;

Робототехнический симулятор общего назначения Gazebo предоставляет возможность симулировать работу роботов, робототехнических систем и разрабатываемых для них алгоритмов, симулировать работу сенсоров, а также включает в себя возможность гибкой настройки физических параметров, как робота, так и объектов окружающего мира. Это особенно важно при разработке алгоритмов и робототехнических систем, направленных на взаимодействие с человеком, в том числе и в медицинских целях. Данный симулятор широко используется в ходе исследовательской деятельности по различным направлениям, среди которых симуляция процедуры автономного наложения шва на открытую рану [8–10], моделирование автономного робота для задач поиска и спасательных операций [11], симуляция автономной парковки [12], построение симуляционного окружения на основе изображений [13], разработка алгоритмов для антропоморфных роботов [14], разработка алгоритмов планирования пути [15], моделирование и симуляция работы гусеничного робота [16] и др.

Данная выпускная квалификационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Первая глава содержит обзор актуальной литературы, позволяющий выявить сильные и слабые стороны существующих исследований на тему робототехнической пальпации. Во второй главе рассматриваются теоретические аспекты тем, затрагиваемых в ходе данной работы. Третья глава посвящена описанию этапа симуляции и модулирования каждой из компонент разрабатываемой системы. В четвёртой

главе описывается разработанная архитектура автономной системы пальпации и её составляющие. В пятой главе представлены результаты симуляции работы разработанной автономной системы.

# 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

## 1.1 Управление ходом процедуры автономной пальпации

В исследованиях, затрагивающих управление процессом пальпации, авторы часто представляют решения проблем нахождения маршрута покрытия исследуемой поверхности, которая зачастую сводится к решению проблемы планирования пути для рабочего органа робота, на котором установлен какой-либо сенсор для получения механических характеристик пальпируемой поверхности. Целью данного направления является разработка таких алгоритмов, которые позволят роботам, осуществляющим пальпацию, эффективно выполнять перемещение зонда, отвечающего за измерение характеристик поверхности, по исследуемой поверхности. В настоящее время активно набирает популярность использование методов машинного обучения, которые постепенно вытесняют статистические методы на задний план.

В работе [17] представлен алгоритм передвижения робототехнического манипулятора по неплоской поверхности с постоянной прикладываемой силой. Данный алгоритм реализуется при помощи стратегий смешанного контроля положения и сил и контроля внутреннего сопротивления манипулятора - схема управления, позволяющая достичь желаемого механического взаимодействия робота с исследуемой поверхностью за счет соотношения между такими внутренними характеристиками манипулятора, как жесткость, затухание и инерция, позиция и сила [18]. Измеренные силы используются для расчета нормальных и тангенциальных векторов к поверхности, которые затем совместно с вышеупомянутыми силами используются для генерации необходимых для поддержания постоянной прикладываемой силы команд. Дополнительно реализовано динамическое управление скоростью движения: на основе нескольких последовательных позиций рассчитывается примерный радиус дуги движения манипулятора, находящийся в прямо пропорциональной зависимости со скоростью.

В исследовании [19] авторы сравнивают несколько техник обхода неплоской поверхности для избыточных манипуляторов, которые сводятся к решению задачи коммивояжера. Для обхода сгенерированного по исследуемой поверхности графа рассматривается два вида задач: классическая задача коммивояжера и обобщенная задача коммивояжера. В то время как в случае задачи первого типа роботу необходимо с минимальными затратами посетить все вершины графа, в случае задачи второго типа множество вершин графа разбито на кластеры, и роботу необходимо посетить по одной вершине из каждого кластера [20]. Также в противовес евклидовому расстоянию, используемому в качестве метрики стоимости пути для классической задачи коммивояжера, авторы предлагают в качестве стоимости использовать время выполнения операции и затраты на движение соединительных узлов манипулятора, которые рассчитывается как суммарное смещение всех соединительных узлов робота при переходе от одного состояния к следующему. Для генерации графа используется сенсор Kinect, которым оснащен робот и который на первом этапе генерирует облако точек для исследуемой поверхности, после чего полученное облако точек аппроксимируется набором локальных плоскостей. Аппроксимация плоскостями происходит следующим образом: случайно выбирается точка из облака точек, после чего для этой точки и набора точек её окрестности алгоритмом RANSAC генерируются плоскости до тех пор, пока одна из них не будет иметь среднеквадратическую ошибку меньше определенного порога. Данный алгоритм, в отличие от широко известного метода наименьших квадратов, не подвержен воздействию случайных выбросов [21], поэтому точки, «не вписывающиеся» в генерируемую плоскость, отбрасываются. После того как исследуемая поверхность аппроксимирована локальными плоскостями, те из них, которые удовлетворяют условию достижимости, становятся узлами графа, а остальные отбрасываются. Каждый узел соединяется ребром с определенным числом своих соседей в заданном радиусе, после чего те ребра, которые не прошли проверку на



коллизии в ходе симуляции движения вдоль них рабочего органа робота, отбрасываются, и на этом заканчивается этап генерации первоначального графа. Для обобщенной задачи коммивояжера каждый узел первоначального графа представляется в качестве кластера, после чего для каждого ребра графа генерируется набор решений задач обратной кинематики, которые и становятся узлами графа. Таким образом, в кластерах содержатся узлы, представляющие собой возможные состояния манипулятора, а каждые два последовательных состояния соединены ребром, в качестве весов которых используются метрики, описанные выше. Однако авторами было обнаружено, что такой алгоритм приводит к экспоненциальному увеличению узлов и, следовательно, к большим временным затратам на вычисление оптимального решения. В ходе предварительных экспериментов было выявлено, что наибольший выигрыш в затратах на движения соединительных узлов манипулятора при сравнении решений классической и обобщенной задач коммивояжера вносит компонента, связанная с ориентацией рабочего органа робота. Было принято решение реализовать «частичную» задачу коммивояжера, когда сначала отдельно оптимизируется ориентация рабочего органа робота, а затем, обладая фиксированным переходом рабочего органа робота, производить оптимизацию оставшихся компонент. Эксперименты по обходу неплоских поверхностей показали, что с точки зрения новых метрик (затраты на движение соединительных узлов и время выполнения операции) оба варианта обобщенной задачи коммивояжера приводят к лучшим результатам, чем использование классического варианта. Однако классический вариант приводит к меньшей длине пути и к значительно меньшим затратам по времени вычисления оптимального пути.

В статье [22] представлен алгоритм контроля манипулятора на основе как прямой, так и обратной связи, который динамически управляет движением, прикладываемой силой и внутренней жесткостью манипулятора. Для реализации системы обратной связи вводится ошибка, определяющаяся

как отклонение текущего положения манипулятора от требуемого положения, рассчитываемого с учетом силы, которая должна быть приложена к поверхности, и вектора нормали к поверхности в текущей точке. Так, значение матрицы внутренней жесткости манипулятора, а, следовательно, и матрицы затухания, корректируются в зависимости от ошибки - если ошибка велика, внутренняя жесткость увеличивается, чтобы компенсировать ошибку за счет меньшей податливости манипулятора. В режиме симуляции алгоритм был протестирован для задач совершения надреза, сверления и обхода поверхности; в ходе экспериментов был протестирован лишь режим обхода неплоской поверхности. И симуляция и эксперименты продемонстрировали способность алгоритма успешно адаптировать поведение манипулятора в случае неравномерностей поверхности - как геометрических, так и механических.

В статье [23] авторы предлагают в целях автономного определения формы поверхности использовать непрерывные циклоидальные движения вместо растрового сканирования всей поверхности, так как в таком случае присутствует компенсация возникающих в результате направленного движения сенсора деформаций ткани за счёт избыточности измерений, что используется для более точной оценки параметров поверхности. Данный метод предполагает наличие предварительной оценки усредненных нормалей к областям исследуемой поверхности, которая, к примеру, может быть вычислена на основе изображений поверхности, полученных во время или до проведения процедуры. Перпендикулярно данным нормалям осуществляется движение рабочего органа робота, таким образом, постоянное направление движения в локальной области ограничивает область применения предлагаемого алгоритма областями с небольшой кривизной. В ходе обхода поверхности формируется облако точек, которое путем интерполяции может быть преобразовано в поверхность. Для определения жесткости исследуемой поверхности предлагается использовать алгоритм, при котором измерения

проводятся в дискретных точках поверхности, формируя сетку значений, при этом в местах повышенной жесткости разрешение сетки увеличивается, приводя к большему числу измерений для данной области. Применение данного алгоритма, в отличие от альтернативного варианта, когда сенсор вдавливается в исследуемую поверхность и в таком положении обходит всю область, имеет меньше шансов вызвать смещение или иную деформацию исследуемой ткани и тем самым привести к некорректной оценке жесткости. Предлагаемый алгоритм определения формы поверхности был протестирован в ходе экспериментов на настоящей ткани бычьей почки, значительно превзойдя альтернативный вариант в точности. Эффективность предлагаемого алгоритма определения жесткости также была продемонстрирована в ходе экспериментов, проведённых на искусственной модели. Данное исследование базируется на предположении о линейности характеристик эластичности исследуемых материалов, что возможно при небольших деформациях [24].

В исследовании [25] демонстрируется алгоритм обхода неплоской поверхности с прикладываемой постоянной нормальной силой. Для работы алгоритма используются данные, полученные с тактильного сенсора, который на основе показаний с шестиосевого датчика сил и моментов сил способен определять амплитуду и направление нормальных и тангенциальных сил в точке соприкосновения сенсора с поверхностью, а также координаты этой точки в системе отсчета сенсора. Как только происходит контакт с поверхностью, позиция сенсора вычисляется при помощи прямой кинематики, и на основе направлений полученных значений тангенциальных сил вычисляется следующая позиция, которая при помощи обратной кинематики переводится в состояния соединительных узлов робота. В процессе движения робота постоянно проводится проверка нормальной силы реакции поверхности и, если её значение выходит за пределы необходимого диапазона, сенсор перемещается вдоль нормали к текущей

точке поверхности, тем самым увеличивая или уменьшая прикладываемую силу. Стоит отметить, что в данном исследовании авторы работают с роботизированным пальцем, имеющим лишь две степени свободы и способным совершать обход поверхности лишь в двух противоположных друг другу направлениях, поэтому, чтобы исследовать различные участки поверхности, роботизированный палец крепится к манипулятору с шестью степенями свободы.

В работе [26] авторы проводят исследование, направленное на сбор информации о методиках пальпации врачей, которые в дальнейшем можно использовать при разработке алгоритмов робототехнической пальпации. Методики пальпации авторы сводят к комбинациям и вариантам модуляций сил, прикладываемых к исследуемой ткани, а также скоростей и траекторий движений пальцев и рук врачей. Вследствие того, что на текущий момент большинство решений в области робототехнической пальпации в качестве сенсора используют одиночный зонд с какими-либо датчиками, в исследовании рассматривается вариант пальпации с помощью одного пальца руки. В ходе экспериментов двадцать испытуемых, десять из которых являлись опытными врачами, а оставшиеся десять - новичками, проводили пальпацию искусственного образца ткани с опухолями различного размера. Прикладываемые силы, скорости и траектории движения пальцев испытуемых были зафиксированы, после чего был произведен статистический анализ полученных данных. В ходе статистического анализа было выделено несколько закономерностей в поведении сил и скоростей, на основе которых были проведены симуляции процедуры пальпации методом конечных элементов.

В статье [27] предлагается использовать средства машинного обучения с целью обнаружения и определения границ опухолей на основании показаний жесткости исследованной при помощи робототехнической пальпации поверхности. Для обнаружения опухоли авторы используют

марковские случайные поля, которые позволяют выполнять классификацию текущей области, учитывая характеристики окружающих её точек, и алгоритм EM-оптимизации для увеличения надежности и устойчивости к шумам. В качестве обучающих данных классификатору предоставляется эластографическое изображение искусственного образца ткани с опухолью, полученное путем ультразвукового исследования. В ходе процедуры робототехнической пальпации робот автономно проводит измерения жесткости исследуемой поверхности на первоначальном наборе точек. Авторы применяют ту же технику обхода поверхности, что и авторы статьи [23], то есть разрешение сетки измерений изменяется в зависимости от измеренной жесткости текущей точки. После проведения измерений, полученные значения жесткости подаются на вход классификатору, который в случае необходимости генерирует новый набор точек, в которых необходимо сделать измерения. Предложенный алгоритм был успешно протестирован в ходе экспериментов на искусственной плоской поверхности, содержащей одну опухоль.

В исследовании [28] предлагается метод определения геометрической формы трёхмерных объектов на основе информации, полученной в ходе тактильного контакта с исследуемой поверхностью. В данном методе применяется алгоритм распознавания локальной формы, основанный на использовании уравнений нормальной кривизны, которые состоят из главных значений кривизн и главного направления. В ходе непрерывного скольжения тактильных сенсоров по участкам поверхности система получает данные о расстоянии, пройденном сенсором, изменении точки контакта и угле поворота - этих данных достаточно, чтобы для кривой, образованной пройденной траекторией, вычислить значение нормальной кривизны. Имея значения нормальной кривизны для трёх исходящих из одной точки кривых, углы между которыми известны, можно вычислить значения главных кривизн и главного направления, которых достаточно для описания

локальной поверхности. Для реконструкции глобальной формы применяется метод интерполяции для вычисленных значений главных кривизн и нормальных векторов. Интерполяция главных кривизн проводится методом обратных взвешенных расстояний с предположением, что поверхность обладает локально однородной кривизной.

В работе [29] описывается метод одновременного определения формы и жесткости трёхмерной поверхности в ходе её непрерывной адаптивной пальпации. Авторы применяют и сравнивают в ходе экспериментов на искусственной модели трёхмерной поверхности с переменной жесткостью два варианта использования Гауссовских процессов. Первый вариант представляет собой функцию силы реакции исследуемой поверхности, представленную Гауссовским процессом и обновляемую с получением новых измерений, после чего производится вычисление значений жесткости и параметров формы поверхности. Второй вариант предполагает представление жесткости и формы исследуемой поверхности в виде двух отдельных Гауссовских процессов, обновление которых происходит на основе произведенных измерений сил. Исследование проводится с предположениями о том, что для определения жесткости достаточно показаний нормальных сил, и что отношение между жесткостью и силой линейно. Адаптивность пальпации заключается в постоянной оценке и изменении траектории движения сенсора по поверхности с целью получения информации в неизвестных областях и уточнение информации в областях интереса. В ходе процедуры сенсор непрерывно движется вдоль проложенной по поверхности траектории, при этом траектория движения сенсора в оси, перпендикулярной поверхности, то есть описывающая глубину пальпации, образует синусоидальную форму. Эксперименты, проведенные на искусственной неплюской поверхности, показали, что предложенная система способна успешно определять форму и жесткость поверхности.

В статье [30] представлен метод определения формы плоских поверхностей трехмерных объектов, в ходе которого манипулятор касается точек исследуемой поверхности и на основе полученной информации обновляет свое представление о её форме. В данном методе алгоритм выбора точек интереса основывается не только на текущей неопределенности, но и на оценке стоимости пути от текущего положения сенсора до предположительных точек интереса. В существующих до этого алгоритмах выбор точек интереса производился нерационально с точки зрения временных затрат: выбор лишь на основе неопределенности мог привести к длинным дистанциям между точками интереса, а растровое сканирование предполагало анализ слишком большого числа точек. Для моделирования формы исследуемой поверхности используется неявная поверхность, заданная множеством фиксированного уровня функции, которая моделируется Гауссовским процессом, предоставляющим эффективный способ, как для оценки формы, так и для получения её неопределенности. Оценка стоимостей путей до точек интереса основана на использовании графов и методе вероятностного оптимального управления - линейно-решаемых проблем марковского принятия решения (LS-MDP - Linearly-Solvable Markov Decision Problems), работающего быстрее, чем используемый в большинстве случаев алгоритм Дейкстры. Для формирования графа исследуемая поверхность разбивается на ячейки, которые становятся вершинами графа. В ходе симуляций и экспериментов было продемонстрировано превосходство предлагаемого метода над методами случайного выбора точек и выбора точек на основе неопределенности: новому алгоритму требуется исследовать меньшее число точек и проделать меньший по длине путь для того, чтобы уменьшить ошибку определения формы.

В исследовании [31] авторы рассматривают способ обнаружения и определения формы опухоли, при котором распределение жёсткости

исследуемой области представлено в виде Гауссовского процесса, что позволяет обновлять генерируемую карту жесткости с каждым новым полученным набором измерений, после чего выносить решение о следующих позициях, в которых необходимо произвести измерения. В качестве алгоритма, отвечающего за выбор точек для измерений, авторы предлагают использовать метод верхнего доверительного интервала на основе неявного множества фиксированного уровня (ILS-UCB - Implicit Level Set Upper Confidence Bound). Основанием для такого выбора служит проводимое в симуляции сравнение этого метода с двумя другими - методом уменьшения ожидаемой дисперсии (EVR - Expected Variance Reduction), делающего упор на менее исследованные участки поверхности, и методом верхнего доверительного интервала (UCB - Upper Confidence Bound), соблюдающего баланс между исследованием областей с высокой ожидаемой жесткостью и областей с неизвестной жесткостью. Предлагаемый алгоритм схож с UCB, с той лишь разницей, что поиск сконцентрирован на областях с фиксированным уровнем жесткости, который определяется после каждой итерации на основании максимального и минимального значения жесткости, полученных в ходе предыдущей итерации - таким образом, число проводимых измерений, необходимых для обнаружения опухоли и анализа её формы, значительно уменьшается. Авторы проводят эксперимент, в котором алгоритм ILS-UCB, наилучшим образом показавший себя на этапе симуляции, сравнивается с плотным сканированием всей исследуемой поверхности. И хотя предлагаемый алгоритм требует в несколько десятков раз меньше измерений, в точности определения формы опухоли он выигрывает только в случае простой формы (круг), в то время как растровое сканирование выигрывает в точности определения более сложных форм (форма подковы). Стоит отметить, что данное исследование базируется на предположении о том, что пространственные характеристики поверхности и глубина опухоли известны заранее, в исследуемой области присутствует



только одна опухоль, а анализируемая поверхность представляет собой плоскость.

В работе [32] авторы представляют метод автономного активного исследования поверхностей для определения их границ, который в том числе может быть использован в робототехнической пальпации. Метод активного исследования заключается в том, что в ходе работы алгоритма полученные с сенсоров данные способны повлиять на дальнейший ход исследования поверхности, в то время как в случае пассивного исследования обход поверхности происходит по заранее заданному алгоритму, определяющему неизменный в ходе процедуры порядок сбора информации. Чтобы оценить положение и ориентацию границы применяется алгоритм Байесовского принятия оптимального решения, который снижает неточности измерений ёмкостного тактильного сенсора. Для задач обучения был собран набор данных, включающий в себя измерения, снятые с внутренней поверхности, границ и выходящих за пределы границ тестовой поверхности областей. На основе собранных данных были сформированы классы для создания классификатора, определяющего тип границы на основе показаний тактильного сенсора. В ходе работы алгоритма проводится статистический последовательный анализ, использующий теорему Байеса для обновления апостериорного распределения согласно проведённым измерениям до тех пор, пока не будет достигнуто граничное условие принятия решения. Так, находясь на границе исследуемого объекта, сенсор будет незначительно менять своё положение, пока не сделает такое измерение, которое приведет к принятию удовлетворяющего граничному условию решения о положении и ориентации исследуемой граничной области, после чего на основе данного решения сенсор продолжит движение вдоль границы. Таким образом, будет получен контур объекта. Эффективность предложенных методов испытывается в ходе симуляций и экспериментов на объектах с границами различной сложности, в результате которых демонстрируется превосходство

методов активного исследования над методом пассивного исследования. Также было исследовано влияние на эффективность работы алгоритма внедрения двух методов, учитывающих апостериорное распределение предыдущего этапа принятия решения: первый - на этапе формирования априорного распределения, второй - на этапе формирования апостериорного распределения. Экспериментально было показано, что внедрение вышеупомянутых методов привело к более точному и быстрому определению границ.

В статье [33] авторы используют обновляемую функцию "полезности", позволяющую уменьшить время, затрачиваемое на исследование поверхности, уделяя большее время анализу тех областей, которые с большей вероятностью имеют высокое значение жесткости. Предлагаемая функция, представленная в виде Гауссовского процесса, основывается на информации с изображений МРТ или компьютерной томографии, полученных перед проведением процедуры пальпации, и обновляется с получением новых измерений жесткости. Для генерации траектории движения робота, охватываемой все необходимые для измерения области поверхности, применяются и сравниваются между собой два алгоритма: алгоритм, основанный на эргодическом покрытии, и байесовский алгоритм оптимизации. В случае эргодического покрытия работа алгоритма делится на временные интервалы, время которых на основе текущего состояния функции полезности распределяется между различными областями исследуемой поверхности, а обновление состояния Гауссовского процесса и генерация нового набора точек интереса происходит по окончании каждого временного интервала. Так, сенсор проведет большее количество времени и, следовательно, получит больше информации в тех регионах, которые с большей вероятностью содержат область повышенной жесткости; остальные области также будут исследованы, однако на это будет потрачено меньшее количество времени. В случае байесовского алгоритма оптимизации работа

алгоритма делится на дискретные шаги: на каждом шаге сенсор производит измерение в текущей точке интереса, на основе полученных измерений обновляется Гауссовский процесс, после чего принимается решение о следующей точке интереса. В ходе экспериментов было показано, что байесовский алгоритм оптимизации требует исследования меньшего числа точек и меньшей площади поверхности, прежде чем обнаружить опухоль, однако данный алгоритм больше подвержен шумам и сильнее зависит от первоначальной информации о предположительном расположении опухолей. Другими достойными упоминания особенностями данного исследования являются эксперименты, проводимые на неплоской поверхности, содержащей несколько опухолей одновременно.

В исследовании [34] представлен метод обхода неплоской поверхности с целью определения формы трехмерного объекта на основе активного обучения, использующегося для генерации оптимального пути. Данный вариант обхода, приводящий к скольжению по поверхности, по сравнению с дискретным взаимодействием с точками поверхности позволяет за меньшее время обойти большую площадь и, следовательно, собрать больше информации. Форма поверхности представляется в виде неявной поверхности, задаваемой функцией фиксированного уровня, которая моделируется Гауссовским процессом. Представление в виде неявных поверхностей предоставляет возможность получать нормали и кривизну поверхности в произвольной точке. Генерация областей интереса происходит на основе дисперсии Гауссовского процесса, и приводит к балансу между исследованием областей с высокой неопределенностью, и областей с низкой определенностью, что приводит к лучшей аппроксимации функции. Однако в данном исследовании авторы, чтобы реализовать непрерывный обход поверхности, учитывают неопределенность не в конкретных точках, а вдоль кривой, пролегающей по поверхности. Таким образом, генерируется путь, непрерывно делая измерения вдоль которого, робот получает информацию,

которая наиболее важна для определения формы поверхности. Чтобы реализовать движение рабочего органа манипулятора по необходимой траектории, необходимо осуществить поддержание контакта с поверхностью, задание позиции взаимодействия и направления движения. Поддержание контакта реализовано путем передачи роботу нормали к поверхности, вычисленной в данной точке на основе текущего состояния Гауссовского процесса: при потере контакта с поверхностью, в связи с отсутствием показаний с тактильного сенсора, значение неявной функции поверхности становится больше фиксированного уровня, на котором функция задана, и, следовательно, возникает негативный градиент, что приводит к движению, направленному вдоль нормали, в сторону исследуемой поверхности. Изменение позиции рабочего органа манипулятора происходит в локальной тангенциальной плоскости, которая является касательной плоскостью к поверхности в текущей точке. Траектория движения также проецируется на вышеупомянутую плоскость. В качестве алгоритма генерации пути авторы рассматривают два подхода: локальный и глобальный. Локальный подход заключается в проецировании градиента функции дисперсии Гауссовского процесса на локальную область текущей тангенциальной плоскости, таким образом, выбирается путь, сильнее устраняющий неопределенность Гауссовского процесса. Глобальный подход предполагает построение пути, конечной точкой которого является точка с максимальным значением дисперсии, причем путь строится таким образом, чтобы пролегать по точкам с высоким значением дисперсии. Авторы применяют метод удаляющегося горизонта, что приводит к генерации нового пути с учётом новых данных после того, как пройдена небольшая часть текущего пути. В качестве генерации оптимального пути до конечной точки применяется алгоритм Дейкстры - для этого из функции математического ожидания Гауссовского процесса методом «marching cubes» извлекается полигональная сетка исследуемого объекта, которая может быть представлена как ненаправленный взвешенный граф, веса рёбер которого заданы величинами,

обратными значениям функции дисперсии Гауссовского процесса. Чтобы избежать случая, когда сгенерированный путь пролегает через точку, достичь которой робот не может, для таких точек вводится увеличивающая корректировка значения дисперсии, делая такие точки неприоритетными для исследования. Для определения окончания процедуры исследования поверхности вводится мера неопределённости, основанная на нормализованном значении интеграла функции дисперсии Гауссовского процесса. В ходе симуляции было продемонстрировано превосходство в точности и скорости предложенных методов над двумя алгоритмами выбора точек для исследования - случайного и на основе неопределенности. Также в ходе экспериментов на неплоской поверхности успешно был протестирован метод с использованием локального алгоритма генерации пути.

В работе [35] авторы развивают идеи, представленные в статье [33], применяя техники активного обучения для задания траектории движения робота. В исследовании проводится сравнение алгоритма байесовской оптимизации, использованного в работе [33] с тремя техниками активного обучения: поиск активной области (AAS - active area search), определение множеств фиксированного уровня (LSE - level sets estimation) и выборка неопределенности (UNC - uncertainty sampling). Алгоритм AAS делит исследуемую область на подобласти, в каждой из которых вычисляет усредненное значение функции жесткости, на основе которого относит подобласть либо к здоровой ткани, либо к опухоли. Алгоритм LSE на основе доверительного интервала Гауссовского процесса определяет набор точек, значение функции жесткости в которых выше определенного уровня. Использование алгоритма UNC приводит к исследованию таких точек поверхности, которые обладают граничной дисперсией, то есть значение функции жесткости в данной точке оценено наименее точно. Результатом использования алгоритма байесовской оптимизации является исследование тех областей пальпируемой поверхности, предполагаемая жесткость которых

максимальна. После того, как становятся известны области интереса, используется метод кривых Дубинса для генераций возможных траекторий, проходящих через эти области. Для возможных траекторий применяется вероятностная оптимизация траектории методом перекрестной энтропии. Такой алгоритм генерации и оптимизации траектории позволяет осуществлять предлагаемый алгоритм поиска опухолей с помощью любого робота, обладающего заранее определенным набором возможных движений. Также в представленной системе был реализован алгоритм обхода препятствий, который был успешно протестирован в симуляции. В ходе симуляций и экспериментов, проведенных на искусственных моделях плоских поверхностей, содержащих различные конфигурации опухолей и предполагающих линейную модель жесткости, вышеупомянутые алгоритмы были протестированы как для дискретной пальпации, так и для непрерывной. Стоит отметить, что эксперименты проводились для трех различных робототехнических платформ: промышленный манипулятор с шестью степенями свободы, исследовательский комплекс da Vinci и роботизированная платформа с выдвижным исполнительным органом. Результаты симуляций и экспериментов показали превосходство алгоритма AAS над остальными для обоих видов робототехнической пальпации.

В статье [36] авторы представляют метод робототехнической пальпации, в котором траектория обхода исследуемой поверхности генерируется на основе траекторий, используемых людьми в ходе проведения данной процедуры на искусственной модели ткани, обладающей плоской поверхностью, с одной опухолью. В ходе исследования были выявлены закономерности в траекториях движения и прикладываемых в ходе пальпации силах для двух этапов процедуры: этап общего обхода исследуемой поверхности и этап исследования областей предполагаемого нахождения опухоли. Так, в области интереса преобладали круговые движения вокруг предполагаемой опухоли, а также прикладывалась большая

нормальная сила, чем в процессе общего обхода. Наблюдаемые траектории были представлены в виде Смеси Гауссовских Распределений (GMM - Gaussian Mixture Model), после чего с помощью Регрессии Гауссовской Смеси (Gaussian Mixture Regression - GMR) производилась генерация обобщенных случаев для использования в ходе робототехнической пальпации. В ходе обучения модели траектории, используемые на двух этапах пальпации, различались на основе показаний применяемой силы. Алгоритм работает таким образом, что генерация траектории происходит на основе трех последних показаний измеренной жесткости. Так, если жесткость последних трех исследуемых точек была повышена, генерируется траектория для локального исследования точки интереса, в противном случае генерируется траектория общего обхода поверхности. Предлагаемый алгоритм был применен в ходе робототехнической пальпации того же образца поверхности, который использовался в процессе сбора данных для обучения, и позволил успешно осуществить обход поверхности, обнаружить область повышенной жесткости и провести её тщательное обследование.

В работе [37] представлена хирургическая система, способная в режиме реального времени автономно генерировать карту жесткости исследуемой поверхности и координировать отображение данной карты с соотнесенными друг с другом моделью исследуемой поверхности и изображением со стереокамеры. Авторы демонстрируют эффективность системы, проводя эксперименты искусственной модели, обладающей неплоской поверхностью и содержащей область повышенной жесткости. Процедура включает в себя следующие этапы: соотнесение друг с другом координатных систем стереокамеры, робота и модели исследуемого объекта, определение распределения жесткости на поверхности объекта, наложение карты жесткости на визуальное представление поверхности. Работа системы основана на следующих предположениях: в ходе пальпации форма объекта остается неизменной, за исключением локальных деформаций, вызванных

пальпацией, область повышенной жесткости находится на относительно небольшой глубине от поверхности, прикладываемые силы достаточно малы, чтобы объект мог восстановить свою форму после локальной деформации. Система обладает большой степенью автономности, за исключением необходимости пользовательского ввода данных перед началом процедуры пальпации, который включает в себя определение области интереса для проведения автономной пальпации и участие в процессе соотнесения координатных систем составных частей хирургической системы. Распределение жесткости исследуемой поверхности моделируется Гауссовским процессом, а алгоритм определения множеств фиксированного уровня LSE (Level Set Estimation) отвечает за генерацию точек интереса, обеспечивая быстрое и эффективное обнаружение опухоли. В качестве сенсора в системе используется преобразователь силы в напряжение, основанный на силоизмерительном резисторе и обладающий встроенным контроллером, в котором реализованы алгоритмы усиления аналогового сигнала, фильтрации и автокалибровки, что значительно увеличивает измерительную точность сенсора. Измерения проводятся следующим образом: в ходе пальпации каждой точки данные датчика силы постоянно считываются как до, так и после соприкосновения с поверхностью; как только происходит контакт с поверхностью, зонд продолжает вдавливаться вглубь до тех пор, пока не будет достигнуто граничное условие значения глубины вдавливания или силы реакции поверхности, что необходимо для предотвращения повреждения исследуемой поверхности или зонда, после чего полученные измерения передаются в алгоритм составления карты жесткости, и начинается обратное движение зонда и переход к следующей точке, предназначенной для пальпации. В ходе составления карты жесткости при помощи метода RANSAC находится линейная аппроксимация зависимости между полученными измерениями глубин вдавливания и силами реакции поверхности, коэффициент регрессии которой говорит о степени изменения силы реакции поверхности по отношению к глубине



вдавливания и может быть использован в качестве аппроксимации жесткости поверхности.

## **1.2 Управление ходом процедуры пальпации в режиме телеоперации**

Исследования в области робототехнической пальпации в режиме телеоперации, в отличие от автономного варианта данной процедуры, зачастую включают в себя эксперименты с участием людей, управляющих определенной роботизированной системой, однако результаты, полученные в ходе исследования одного типа пальпации, в некоторых случаях могут быть адаптированы и использованы для развития другого направления исследований. При этом, как отмечается в исследовании [38], пальпация в режиме телеоперации является нестабильной процедурой с точки зрения получения корректных показаний датчиков и безопасности исследуемой поверхности. Так, показания датчиков зачастую зависят от приложенной оператором силы, которая к тому же при превышении определенного значения способна повредить исследуемую ткань. Стоит отметить, что вышеупомянутые проблемы частично решаются использованием визуальной обратной связи, что и было продемонстрировано в [38].

В исследовании [39] авторы в результате проводимых в виртуальном симуляторе экспериментов по пальпации в режиме телеоперации получили и проанализировали используемые в ходе пальпации скорости и прикладываемые силы тринадцати испытуемых. Также был рассчитан коэффициент Вебера - величина, описывающая минимальное значение жесткости (в данном случае), которое может быть различимо человеком. В результате статистического анализа полученных данных было выявлено, что при повышении жесткости материала, прикладываемая для обследования сила также повышается. Также было обнаружено, что чем больше скорость исследования поверхности, тем больше значение коэффициента Вебера (что указывает на пониженную восприимчивость).

В работе [40] авторы проводят исследование, направленное на сбор информации о методиках пальпации врачей, которые в дальнейшем можно использовать при разработке алгоритмов робототехнической пальпации. Десять участников эксперимента провели пальпацию искусственных образцов ткани с несколькими опухолями различного размера, в режиме телеоперации управляя робототехническим манипулятором с датчиком силы, в режиме реального времени получая как визуальную, так и тактильную информацию о полученных результатах проведенных измерений. В ходе эксперимента было проведено сравнение применения методики пальпации с хаотичным исследованием поверхности. Результаты экспериментов показали, что использование определенной методики повышает вероятность обнаружения опухоли. Отсюда можно заключить, что использование случайной генерации траекторий, точек, прикладываемых сил, скоростей в ходе пальпации, как в режиме телеоперации, так и в автономном режиме, не эффективно.

В статье [41] авторы описывают преимущества использования избыточных манипуляторов и на основе экспериментов демонстрируют их превосходство над неизбыточными манипуляторами. Избыточный манипулятор обладает большим числом степеней свободы, чем того требует задача, для которой манипулятор предназначен. Среди достоинств избыточных манипуляторов, особенно полезных в задачах пальпации и проявляющихся уже при наличии одной дополнительной степени свободы, авторы выделяют уменьшение инерции и увеличение вариативности доступных положений и движений. Такие показатели способны увеличить степень чувствительности робототехнических систем и, следовательно, людей к измеряемым параметрам исследуемых поверхностей. В результате экспериментов, в ходе которых проводилось сравнение использования в робототехнической пальпации избыточного и неизбыточного манипуляторов, способность различать области разной жесткости оказалась выше в случаях

использования избыточного манипулятора, приводящего, в том числе и к снижению искажений, вызванных кинематическими и динамическими ограничениями, накладываемыми на работу пользователя. В ходе экспериментов пользователям системы требовалось определить более жесткую поверхность из двух предлагаемых для пальпации. Поведение поверхностей было смоделировано с помощью пружины переменной жесткости. Ориентиром для сравнения служила минимальная жесткость тканей головного мозга, значение модуля упругости которых известна. Перевод в жесткость пружины был осуществлен с помощью закона Гука, и варианты жесткости для сравнения были вычислены относительно данного значения. Также с целью моделирования обстановки, складывающейся в ходе проведения малоинвазивных хирургических операций, движения манипуляторов были ограничены.

В работе [42] авторы показывают, что вероятность обнаружения опухоли повышается при наличии датчиков, позволяющих получать тактильную информацию об исследуемой поверхности в ходе робототехнической пальпации. В качестве такого датчика авторы используют датчик сил, установленный в рабочем органе манипулятора. Авторы также предлагают новый тип сенсора, представляющий собой полосу из трех датчиков силы. В процессе пальпации такой сенсор сигнализирует о наличии области повышенной жесткости, если показания одного из датчиков полосы отличны от показаний остальных. В ходе экспериментов на искусственных образцах два вышеописанных способа сравниваются с пальпацией, основанной лишь на визуальной информации. Использование сенсора с полосой датчиков по сравнению с одиночным датчиком и визуальным осмотром позволяет точнее обнаруживать области интереса.

### **1.3 Получение характеристик пальпируемой поверхности**

Множество исследований в области робототехнической пальпации направлены на создание новых способов получения характеристик

исследуемой поверхности. На данный момент в большинстве исследований используется вариант сенсора, содержащего датчик сил и взаимодействующего с исследуемой поверхностью с помощью шарообразного наконечника, называемого индентором. В качестве наиболее распространенной техники проведения измерений выступает техника «вдавливания», когда в точках, предположительно обладающих повышенной жесткостью, сенсор на определенную глубину вдавливается в исследуемую поверхность, таким образом, считывая показания нормальной силы, возникающей в результате контакта с поверхностью. В ходе данных исследований авторы демонстрируют новые сенсоры и техники, призванные устранить проблемы, возникающие при применении вышеописанных методов.

В исследовании [43] авторы представляют сенсор на колесном ходу для определения жесткости поверхности в ходе робототехнической пальпации. Вместо традиционного шарообразного наконечника данный сенсор использует цилиндр, боковая поверхность которого предназначена для соприкосновения с исследуемой поверхностью, что и приводит к колесному ходу. Для предотвращения скольжения во время проведения измерений, поверхность цилиндра по краям оснащена зубчиками. Проанализировав результаты экспериментов, включающих в себя движение сенсора по плоской поверхности и имитацию движения по неплоской поверхности, авторы пришли к выводу, что значительный вклад результирующую силу реакции поверхности вносит лишь нормальная сила, поэтому в последующих экспериментах боковая и тангенциальная силы не учитывались. На основе измерений, сделанных сенсором в ходе процедуры пальпации, конструируется карта жесткости поверхности с цветовым кодированием. Ещё одной особенностью данного сенсора является возможность работы в режиме вдавливания, когда для получения измерений сенсор, вдавливаясь в определенный набор точек поверхности. Данный режим позволил авторам

получать функцию зависимости напряжения, испытываемого пальпируемой точкой, от времени. Были проведены эксперименты как на искусственной модели плоской поверхности, содержащей расположенные на различной глубине области различной жесткости и размера, так и на настоящих свиных почках, также содержащих искусственные образцы опухолей. Сенсор продемонстрировал высокую степень точности и воспроизводимости измерений и устойчивости к скорости пальпации. По сравнению техникой вдавливания, предлагаемый сенсор проводит измерения непрерывно, способен покрыть большую площадь поверхности за короткий промежуток времени, а также, как показали эксперименты, обладает большей чувствительностью. Стоит отметить, что для обследования свиных почек, имеющих неплоскую поверхность, потребовалось предварительное моделирование их поверхности.

В работе [44] авторы демонстрируют метод робототехнической пальпации, позволяющий количественно оценить модуль упругости исследуемой поверхности. Робототехнический зонд измеряет вызванное смещение и силу реакции поверхности с помощью датчика силы, после чего на основе сравнения полученных измерений и данных, полученных в ходе предварительной симуляции деформации поверхности методом конечных элементов, вычисляется модуль упругости. Проводятся эксперименты на искусственных моделях плоских поверхностей, содержащих область повышенной жесткости на различной глубине. В результате экспериментов предлагаемой системе удалось выделить области повышенной жесткости, однако вычисленные значения модулей упругости получились различными, на что повлияла различная глубина расположения жестких областей.

В статье [45] авторы представляют систему робототехнической пальпации, основной отличительной особенностью которой является учет нелинейности характеристик эластичности поверхности. Данная нелинейность проявляется в тех случаях, когда поверхность испытывает

повышенное напряжение, а при относительно небольших прикладываемых силах, характеристики поверхности ведут себя линейно. Это является одной из причин того, что в большинстве исследований робототехнической пальпации в ходе экспериментов используется относительно небольшая глубина вдавливания сенсора, которая определяется прикладываемой силой. Интерес к нелинейным характеристикам обусловлен тем, что при переходе к нелинейной жесткости, то есть в случае прикладывания большей силы к исследуемой поверхности, отличия между областями различной жесткости становятся более явными. Работа представленного сенсора заключается во вдавливании сенсорного зонда в исследуемую ткань на такую глубину, когда ткань начинает проявлять нелинейные свойства, после чего измеренная сила реакции позволяет определить тип ткани, а также сделать вывод о наличии или отсутствии опухоли. Для оценки эффективности данной системы авторы проводят биомеханическую симуляцию моделируемых методом конечных элементов тканей нескольких типов, а также эксперименты на настоящей козьей груди.

В работе [46] сравнивается эффективность человека и ёмкостного тактильного сенсора с точки зрения способности обнаруживать области повышенной жесткости в мягких тканях. В результате экспериментов на искусственных образцах ткани различной жесткости, содержащей области повышенной жесткости, имеющие различный размер и расположенные на различной глубине, было выявлено, что в подавляющем большинстве случаев для успешного обнаружения области повышенной жесткости тактильному сенсору требуется меньшая глубина вдавливания в исследуемую ткань, а также меньшая приложенная сила.

В статье [47] представлен способ получения параметров эластичности объектов, обладающих неплоской поверхностью, при помощи манипулятора с датчиком сил и стереокамерой или времяпролетной камерой, которая за счет измерения задержки фазы отраженного от объектов инфракрасного

излучения предоставляет информацию о расстоянии до соответствующей каждому пикселю кадра точки сцены [48], что позволяет измерять величину деформации исследуемого объекта. Прежде чем начинать взаимодействие с поверхностью, робот при помощи времяпролетной камеры изучает объект с нескольких сторон, таким образом, получая облако точек, которое затем используется для генерации используемой в симуляции полигональной сетки поверхности объекта. С каждым полученным измерением силы и глубины деформации применяется алгоритм минимизации ошибок на основе градиентного спуска, когда полигональная сетка деформированной поверхности объекта сравнивается с поверхностью, деформированной в симуляции при определенных значениях модуля Юнга (модуля эластичности) и коэффициента Пуассона. Алгоритм заканчивает работу, когда были найдены такие значения параметров эластичности, при которых ошибка сравнения реальной и смоделированной поверхностей станет ниже порогового значения.

В исследовании [49] авторы, проанализировав пораженные раковыми заболеваниями настоящие образцы человеческих почек при помощи робототехнической установки, выявили, что в некоторых случаях эластичность здоровой ткани почек ниже, чем эластичность областей, содержащих опухоль. Данное наблюдение подчеркивает важность составления карты жесткости в ходе анализа исследуемой поверхности, по которой можно обнаружить аномальные участки как повышенной, так и пониженной жесткости, и указывает на отсутствие универсальности зачастую используемого метода обработки показаний датчиков и сенсоров, указывающих лишь на повышенную жесткость ткани.

В исследовании [50] авторы представляют робототехническое решение для пальпации с целью обнаружения рака простаты, предлагая заменить технику пальпации, используемую во многих других исследованиях, когда сенсор вдавливается в исследуемую поверхность и в таком положении

обходит всю область. Данная техника обладает рядом ограничений при переносе на многие частные случаи, поэтому авторы выбирают более характерную для данной области пальпации технику «прочесывания», когда движение сенсора имитирует движение математического маятника. В таком режиме работы сенсор менее подвержен влиянию неоднородности и анизотропности исследуемой поверхности, требуется меньшее время для покрытия поверхности, а также уменьшается вероятность пропустить область интереса или повредить пальпируемую ткань. Однако в ходе экспериментов, сравнивающих две вышеупомянутые техники, не было выявлено явного превосходства одной над другой. Также было выявлено, что значительную информацию несет лишь измеренные нормальные силы реакции опоры, а тангенциальные силы несущественны для целей данного исследования. В данном исследовании было предусмотрено два варианта глубины расположения опухоли, однако эксперименты проводились на плоской поверхности, не был реализован автоматизированный поиск опухоли, таким образом, робототехническая конструкция вручную устанавливалась на необходимую для снятия показаний позицию.

В статье [51] авторы используют моделирование пальпируемой ткани методом конечных элементов для обнаружения областей повышенной жесткости. В ходе робототехнической пальпации измеряются силы реакции поверхности, которые затем прикладываются к модели органа, предварительно построенной на основе полученных в результате компьютерной томографии (СТ) изображений, после чего происходит определение механических характеристик ткани, а именно - модуля эластичности. Для каждой исследуемой области полученное значение модуля эластичности сравнивается со средним значением, что позволяет отнести данную область либо к потенциально содержащей опухоль, либо к здоровой ткани. Эксперименты, проведенные на образце человеческой простаты, продемонстрировали способность предлагаемого метода обнаруживать



области повышенной жесткости - две из трёх таких областей были успешно обнаружены.

Ещё один вариант измерения жесткости представлен в работе [52], где авторы предлагают использовать пневматический сенсор. При соприкосновении с поверхностью возникает разница давления воздуха, содержащегося внутри сенсора, которая и соответствует величине жесткости исследуемой области. Были проведены эксперименты на искусственной неплоской поверхности, содержащей несколько опухолей, которые были успешно обнаружены.

В исследовании [53] представлен улучшенный резистивный тактильный сенсор, который в результате укрепления конструкции лишён зависимости чувствительных элементов (т.е. измерения, сделанные одним чувствительным элементом, не влияют на измерения остальных чувствительных элементов), присущей другим вариантам резистивных сенсоров. При этом, в описываемом сенсоре сохранены все преимущества резистивных сенсоров, среди которых можно выделить линейность измерений, высокую чувствительность и высокую пространственную разрешающую способность. Все вышеупомянутые преимущества нового сенсора, а также способность успешно обнаруживать аномальные области были подтверждены экспериментально на нескольких искусственных образцах ткани, содержащих несколько областей повышенной жесткости различного размера.

В статье [54] авторы рассматривают робототехническую пальпацию в целях обнаружения подкожных опухолей и кровяных сосудов. Предлагается новый сенсор, измеряющий силу реакции поверхности, основываясь на детектируемых датчиком Холла изменениях смещения конца зонда, возникающих в ходе его скольжения по исследуемой поверхности. В сенсоре используются пружины с различными коэффициентами жёсткости, которые

можно менять, таким образом, настраивая чувствительность сенсора для поверхностей различной жесткости. Так как коэффициент жесткости пружины известен, то после получения значения смещения, по закону Гука можно вычислить силу, действующую на пружину. Проводятся эксперименты на искусственной модели кожной ткани, содержащей цилиндрические элементы, имитирующие кровяные сосуды. В ходе экспериментов анализируется работа сенсора при различных диаметрах и глубинах расположения цилиндров, а также различных глубин вдавливания и скоростей передвижения сенсора. На основе проведенных экспериментов авторы утверждают, что жесткость пружины должна быть близка к жесткости исследуемой поверхности. Предлагаемый сенсор был внедрен в хирургическую роботизированную систему daVinci, в составе которой был успешно протестирован в ходе автономной пальпации.

В работе [55] авторы демонстрируют метод одновременной генерации карты жесткости исследуемой поверхности и определения положения сенсора относительно действительных областей данной поверхности, то есть определение того, в какой части пальпируемой поверхности находится сенсор. Исследование предполагает, что для исследуемой поверхности существует предварительная модель, на основе которой робот осуществляет обход поверхности. Предлагаемый метод призван компенсировать возникающие в ходе взаимодействия с поверхностью деформации тканей и, как следствие, ошибки в определении корректных значений жесткости и положения сенсора относительно исследуемой поверхности. Это достигается путём проведения нескольких измерений в исследуемой области, которые позволяют оценить возникающие деформации. Полученная на данном этапе информация затем используется для корректного определения жесткости области и положения сенсора. В симуляции проведено сравнение предлагаемого метода с другим методом, использующим фильтр Калмана для получения достоверных значений жесткости и положения сенсора.

Новый метод показал своё превосходство как в точности определения жесткости поверхности и положения сенсора, так и в устойчивости к шумам. Также успешно проведены эксперименты на искусственной неплоской поверхности, содержащей область повышенной жесткости, и на настоящей свиной печени.

В статьях [56,57] авторы предлагают новый способ получения характеристик исследуемой поверхности в ходе робототехнической пальпации, заключающийся в модуляции прикладываемых сенсором как нормальных, так и боковых сил. Использование данного метода основано на математических моделях, выведенных в ходе анализа техник пальпации, используемых врачами, и призвано заменить стандартный способ пальпации, принятый в робототехнике, когда сенсор с постоянной силой вдавливается и считывает силу реакции в тех областях поверхности, которые представляют интерес с точки зрения пальпации. Так, был выявлен диапазон частот, с которыми прикладываются боковые силы, а также была получена математическая модель, на основе которой прикладывается нормальная сила. Данной моделью является реактивная модель второго порядка, на основе которой с помощью нескольких предыдущих измерений силы реакции поверхности можно вычислить следующее значение прикладываемой силы. В ходе экспериментов на искусственной модели плоской поверхности с несколькими опухолями различного размера предлагаемый авторами алгоритм в процессе анализа областей повышенной жесткости показал своё превосходство над альтернативным алгоритмом, однако продемонстрировал некорректную оценку областей без искусственных опухолей. Также в исследовании демонстрируется необходимость одновременного применения модуляций нормальных и боковых сил, для чего проводятся эксперименты с модуляцией данных сил по-отдельности. Результатами данного эксперимента является отсутствие преимуществ применения модуляции сил по-отдельности перед техникой вдавливания в случаях исследования опухолей

малого размера. В качестве рабочего органа манипулятора используется сферический элемент, который и вдавливается в исследуемую поверхность. Это позволяет рассчитывать модуль эластичности поверхности на основе силы реакции поверхности, радиуса сферического элемента, глубины вдавливания и коэффициента Пуассона материала поверхности. Однако такой подход учитывает лишь линейные характеристики поверхности, поэтому в исследовании используются небольшие деформации ткани, которые не приводят к проявлению нелинейных свойств материала [24].

В работе [58] авторы обращают внимание на проблему актуальности разрабатываемого алгоритма обнаружения областей повышенной жесткости для новых данных. Созданные классификаторы на основе Гауссовской модели и обученные на двух наборах данных, собранных в два разных дня, но для одной и той же искусственной модели поверхности с областями повышенной жесткости, показали свою недееспособность в ходе тестирования на противоположных наборах данных. Таким образом, авторы были вынуждены пересмотреть текущий подход к проблеме, что привело к разработке нового алгоритма, обладающего значительно большей устойчивостью к новым данным. Как отмечают авторы данной статьи, зачастую исследователи выносят решение о работоспособности разработанных алгоритмах, протестировав их на наборах данных, сделанных в одинаковых условиях, что, как показал проведенный в данном исследовании эксперимент, может не являться объективной и корректной оценкой. Вышеописанную тенденцию также можно заметить, проанализировав другие работы, рассмотренные в данном обзоре литературы.

Работа [59] является ещё одним исследованием, в котором работа человека в ходе проведения пальпации анализируется, и полученная в результате анализа информация впоследствии применяется для робототехнического аналога данной процедуры. Авторы исследуют

напряжение (жесткость) человеческого пальца, применяемого в ходе пальпации для оценки глубины расположения опухоли. Шестью испытуемыми была проведена пальпация нескольких искусственных моделей поверхностей, содержащих расположенные на различной глубине участки повышенной жесткости. Работа мышц, отвечающих за напряжение пальца, была зафиксирована при помощи электромиографии и представлена в виде Марковского процесса принятия решений, позволяющего в количественной форме выразить вероятность перехода от одного мускульного состояния к другому. В конечном итоге стало возможным получить Марковскую матрицу перехода от одного состояния к другому. В экспериментах использовался сенсорный зонд с переменной жесткостью, что достигалось путем регулирования натяжения пружин, находящихся в одном из звеньев (link) робота. Для робота были получены так называемые «элементы памяти» в форме распределений вероятности измеренной в ходе пальпации силы реакции поверхности в зависимости от жесткости зонда и глубины опухоли. Таким образом, «элементы памяти» отражают опыт взаимодействия зонда с поверхностью. Авторы разработали алгоритм определения глубины опухоли с применением вероятностной техники машинного обучения на основе Байесовского вывода, использующего вышеописанные элементы. Таким образом, в ходе процедуры робототехнической пальпации изменение жесткости зонда происходит согласно Марковской матрице перехода и текущему значению жесткости зонда. При этом в соответствие каждому состоянию в Марковском процессе принятия решений ставится «элемент памяти», что позволяет оценить глубину расположения опухоли. Эксперименты показали, что точность определения глубины расположения опухоли предлагаемого алгоритма значительно превосходит точность, продемонстрированную людьми и алгоритмом, не использующим адаптивное изменение жесткости зонда.

В исследовании [60] представлен робототехнический зонд переменной жесткости, работающий на основе принципа переменного рычага. Предлагаемый зонд предназначен для осуществления пальпации брюшной области и способен улучшить точность обнаружения и определения глубины расположения внутренних органов. Изменение жесткости зонда осуществляется с помощью стержня, способного скользить по внутренним областям двух звеньев, через которые проложен. Таким образом, прикладываемая к рабочему органу робота сила приводит к изгибу стержня, что вызывает изменение его длины, от чего вследствие рычажного эффекта и зависит жесткость зонда. В ходе симуляций методом конечных элементов и экспериментов была выведена функция зависимости жесткости зонда от длины стержня, после чего проведена пальпация искусственной модели плоской поверхности, содержащей область повышенной жесткости. Эксперимент продемонстрировал возможность предлагаемой системы обнаруживать область повышенной жесткости, с помощью тактильного сенсора и датчика силы.

В статье [61] авторы представляют новый способ измерения жесткости поверхности, основанный на компьютерном зрении, а не на использовании датчика сил, как большинстве других исследованиях, касающихся робототехнической пальпации. Основными компонентами предлагаемого прибора являются камера и четыре цветные пружины, одна из которых имеет коэффициент жесткости, отличный от остальных. Используемый в исследовании алгоритм в ходе скольжения прибора по исследуемой поверхности преобразует полученные после обработки изображения с камеры, содержащие данные об изменении длин пружин, в значения жесткости данной точки поверхности. Также в режиме реального времени с помощью датчика трехмерного положения прибора происходит генерация трехмерной карты жесткости. В ходе нескольких экспериментов, проводимых на плоских поверхностях, были продемонстрированы

возможность прибора различать области с различной жесткостью, пределы углов наклона прибора, при которых он работает корректно, а также способность генерировать трехмерную карту жесткости в режиме реального времени.

В исследовании [62] авторы продолжают работу над системой, представленной ими в статье [29], реализовывая определение жесткости в реальном времени. Это достигается путем использования локальных областей для обновления Гауссовского процесса, обновление которого раньше выполнялось на основе всех измерений, сделанных в течение итерации, что и приводило к большим временным затратам, не позволяющим реализовать обработку результатов в реальном времени. Чтобы обеспечить быстрый доступ к значениям Гауссовского процесса в соседней к исследуемой точке области, для их хранения авторы используют хеш-сетку. Ещё одним нововведением стал обновленный и более точный алгоритм определения формы поверхности, учитывающий прикладываемую силу и её направление. Новая система была протестирована в тех же экспериментальных условиях и с теми же предположениями, что и в статье [29]. В результате экспериментов новая система не показала значительного превосходства над предыдущей версией за исключением возможности получать карту жесткости и форму поверхности в реальном времени.

В работе [63] демонстрируется новый вид сенсора для использования в процедурах робототехнической пальпации. Главной особенностью предлагаемого сенсора является его переменное механическое сопротивление, что увеличивает диапазон чувствительности сенсора. Работа данного сенсора основана на предположении о том, что в момент соприкосновения приведённого в вибрирующее состояние сенсора с поверхностью такие характеристики вибрации, как резонансная частота, амплитуда и механическое сопротивление, меняются. Сенсор снабжен пьезоэлектрическим элементом, который служит как для генерации

вибраций, необходимых для снятия измерений, так и для обнаружения возникновения резонанса, связанного с электрическим сопротивлением элемента. В результате симуляции методом конечных элементов и экспериментов на искусственных моделях поверхностей различной жесткости выдвинутые предположения были подтверждены - для каждого образца поверхности удалось найти такое механическое сопротивление сенсора, которое максимизировало чувствительность при данной жесткости.

В статье [64] представлен прибор для проведения робототехнической пальпации, в состав которого входит микроманипулятор, трёхосевая линейная робототехническая платформа и датчик сил и их моментов. Микроманипулятор способен осуществлять движения намного более мелкого масштаба, чем стандартные манипуляторы, многократно увеличивая точность движений в ходе пальпации и предоставляя возможность прикладывать силы малой амплитуды. Предлагаемая система была протестирована в ходе экспериментов по вводу иглы в поверхность, и определению жесткости поверхности. Эксперименты по пальпации проводились на искусственной неплоской поверхности, содержащей области различной жесткости, имеющие различную форму и размер. Для экспериментов по вводу иглы использовалась двухслойная искусственная форма, каждый слой которой обладал отличным от других значением жесткости. Пальпация была проведена методом вдавливания зонда в дискретных точках поверхности, после чего была сгенерирована карта жесткости поверхности, на которой присутствовали все области повышенной жесткости, кроме наименее жесткой из них. Анализ сил реакции поверхности в ходе экспериментов по вводу иглы позволил обнаружить границу между двумя слоями различной жесткости.

В исследовании [65] авторы предлагают метод обнаружения опухолей при помощи деформации исследуемой ткани путем прикладывания постоянной силы и последующим анализом изменений в форме поверхности,



вызванных деформацией. Преимуществом представленного метода является способность обнаруживать признаки нездоровой ткани в соседних областях. Данный подход предполагает анализ возникающих деформаций на основе полученных с камер изображений - это осуществимо, так как различия в жесткости между здоровой тканью и опухолью приводят в том числе и к визуальным отличиям в случае их деформации. В ходе симуляции методом конечных элементов были созданы модели здоровой ткани и опухоли, после чего была осуществлена их деформация при помощи модели зонда, имеющего полусферическую форму. Стоит отметить, что созданные модели тканей учитывают нелинейные свойства, присущие эластичным тканям. Кривые, образованные в точках приложенной силы, а также в области вокруг данных точек, были получены в виде облаков точек. После вычисления функций, описывающих полученные кривые, были смоделированы деформированные поверхности здоровой ткани и опухоли и проведены сравнение и анализ их физических свойств, на основе которых были предложены два метода обнаружения опухоли. Первый метод заключается в анализе объемов, вытесненных деформациями, значения которых можно вычислить, обладая функциями образующихся кривых. Вторым методом заключается в анализе градиента в областях, находящихся близко к точке деформации. В ходе симуляций на плоской поверхности, содержащей опухоль, была продемонстрирована эффективность обоих методов.

В работе [66] авторы разрабатывают математическую модель взаимодействия зонда с поверхностью, на основе которой конструируют тактильный сенсор, способный измерять модуль эластичности пальпируемой поверхности. Сенсор состоит из датчиков силы и измерительных элементов, определяющих ширину и площадь соприкосновения с поверхностью. Предложенная математическая модель основана на использовании формулы Эшелби-Строха, определяющей соотношение между механическим напряжением, деформацией и смещением для содержащейся в объеме

эластичного материала области повышенной жесткости. Для обеспечения сходимости математической модели авторы применяют методы ограничения глобального смещения, ограничения инверсии локального механического напряжения и множественной линейной суперпозиции.

В статье [67] авторы с целью обеспечения получения наиболее точных результатов измерений в ходе робототехнической пальпации применяют основанный на использовании нейронных сетей алгоритм компенсации возникающих в результате взаимодействия сенсорного зонда с исследуемой поверхностью шумов и инерциальных и гравитационных сил. Авторы рассматривают пальпацию при помощи дискретного вдавливания, а в качестве характеристики механических свойств пальпируемой поверхности используют модуль Юнга или модуль эластичности, который позволяет определить эластичность ткани на основе силы взаимодействия зонда с тканью и глубины вдавливания, а также учитывает геометрические характеристики зонда. Как отмечают авторы, вышеописанных проблем можно избежать, применяя статическую пальпацию - когда в каждой пальпируемой точке зонд задерживается в состоянии покоя, получая измерения и усредняя их по времени. Однако такой подход приводит к огромным временным затратам на процедуру пальпации. Гравитационную силу возможно вычислить на этапе инициализации работы сенсора, инерциальная сила же моделируется с помощью искусственной полносвязной трехслойной нейронной сети прямого распространения. Такая архитектура была выбрана в связи со способностью трехслойных нейронных сетей осуществлять аппроксимацию любой гладкой нелинейной функции в компактном пространстве. В ходе моделирования применялся метод обучения с учителем, в качестве данных входного слоя использовались данные о движении робота (скорости и ускорения), в качестве выходных данных использовались измерения датчика силы. Для генерации обучающих данных были получены показания датчика сил в ходе свободного движения

зонда, то есть без какого-либо взаимодействия с поверхностью. Эффективность предложенного алгоритма подтверждается в ходе экспериментов на искусственной модели плоской поверхности с несколькими областями повышенной жесткости, расположенных на различной глубине.

В работе [68] представлена робототехническая платформа для автоматизированной пальпации образцов ткани, отличительными особенностями которой являются совместное использование датчиков силы и ультразвукового сенсора для задачи выделения областей повышенной жесткости, а также управление ходом процедуры при помощи движений платформы, на которой находится пальпируемая ткань. Перед проведением процедуры пальпации при помощи включенной в состав робототехнической платформы камеры определяется форма образца ткани, после чего на поверхности образца задается набор точек, в которых будут произведены измерения. В качестве меры жесткости ткани используется отношение разности измеренных сил, где начальное значение выбиралось в момент начала установления контакта сенсорного зонда с пальпируемой поверхностью, и разности глубины пальпации. Для кластеризации пальпируемых точек применяется метод нечёткой кластеризации C-средних; в качестве критерия наличия области повышенной жесткости были протестированы два варианта: правило «И» (когда точка признана опухолью в результате анализа данных и с датчика сил, и с ультразвукового сенсора) и правило «ИЛИ» (когда точка признана опухолью в результате анализа данных либо с датчика сил, либо с ультразвукового сенсора). В ходе экспериментов на различных образцах искусственных тканей с плоской поверхностью, содержащих несколько областей повышенной жесткости разного размера, было выявлено, что датчик силы лучше справляется с обработкой больших областей повышенной жесткости, в то время как ультразвуковой сенсор точнее определяет небольшие области повышенной

жесткости. Это приводит к тому, что лишь использование правила «ИЛИ» позволяет обнаружить все области повышенной жесткости.

В исследовании [69] автор представляет обновленную версию сенсорного зонда, описанного в [52], работа которого теперь включает использование оптоволоконных технологий для определения глубины вдавливания. Среди преимуществ новой модели также можно выделить увеличенную и переменную глубину вдавливания, меньший диаметр зонда, который теперь удовлетворяет требованиям малоинвазивной хирургии, а также большая чувствительность к силам реакции поверхности. В ходе экспериментов на свиной почке, содержащей область повышенной жесткости, новый вариант зонда продемонстрировал повышенную точность и меньшую подверженность шумам.

## **2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АВТОНОМНОЙ ПАЛЬПАЦИИ**

Как было упомянуто выше, в робототехнической пальпации, представленной в данной работе, можно выделить три взаимосвязанных аспекта: получение информации о геометрических свойствах поверхности, получение информации о физических свойствах поверхности и обход поверхности. Каждый из этих аспектов будет более подробно рассмотрен далее в этой главе. Также нельзя забывать о медицинских аспектах описываемой процедуры, которые и должны определять разрабатываемую робототехническую систему.

### **2.1 Медицинские аспекты пальпации**

Пальпация - это метод медицинской диагностики, который заключается в обследовании какой-либо части человеческого тела при помощи рук. На основе полученных тактильных ощущений, которые могут включать в себя сведения о жёсткости или геометрических особенностях пальпируемой области, врач может сделать вывод о состоянии пациента.

Выделяют два вида пальпации: поверхностную и глубокую. В то время как поверхностная пальпация используется для предварительного обследования, которое включает в себя поиск опухолей и областей повышенной жёсткости, глубокая пальпация применяется для дальнейшего обследования обнаруженных на этапе поверхностной пальпации патологий и, если такая возможность присутствует, оценки состояния внутренних органов пальпируемой области [70]. Повышенная жёсткость может быть вызвана различными факторами: это может быть непроизвольное сокращение мышц, увеличение какого-либо органа в размерах или новообразование [71]. В зависимости от типа пальпации применяются два варианта глубины вдавливания: в ходе поверхностной пальпации глубина обследования составляет один-два сантиметра, в ходе глубокой - до пяти сантиметров [72].

Техники пальпации варьируются в зависимости от пальпируемой области, однако существуют и общие описания процесса, которые можно сформулировать следующим образом: при пальпации необходимо использовать системный подход, каждый раз передвигая пальцы (или иную часть руки, которая используется в ходе пальпации) на близлежащую область до тех пор, пока не будет обследована вся область, подлежащая пальпации [72].

В качестве примера патологии, для обнаружения которой используют пальпацию, можно рассмотреть брюшную область, правый нижний квадрант которой (Рисунок 1) обладает повышенной жёсткостью. Подобный симптом проявляется при аппендиците, локальном перитоните, карциноме слепой кишки или болезни Крона [5]. Перечисленные заболевания, при запоздалом лечении или его отсутствии, могут привести к серьёзным осложнениям или смерти [5]. Стоит отметить, что в ходе пальпации брюшной области врач обращает внимание не только на перечисленные выше патологии - ещё одним фактором являются признаки боли на лице пациента, возникающие в момент пальпации болезненных участков брюшной области [73].



Рисунок 1. Квадранты брюшной области человека<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Источник изображения - [74].

## **2.2 Получение информации о геометрических свойствах поверхности**

Для получения геометрических свойств поверхности применяется анализ данных с времяпролетной камеры Kinect - благодаря технологии измерения времени, затрачиваемого волнами инфракрасного излучения на прохождение дистанции между излучателем камеры и наблюдаемым объектом, такие камеры способны предоставлять информацию о расстоянии. Таким образом, появляется возможность анализа формируемого камерой облака точек, каждый элемент которого хранит информацию о положении в трёхмерном пространстве в системе координат камеры. Для дальнейшего анализа облако точек должно быть переведено в систему координат, в которой находится робот и в которой проводится расчёт позиции рабочего органа манипулятора.

Следующим шагом является вычисление вектора нормали для каждой точки поверхности, подлежащей пальпации. Данная проблема может быть аппроксимирована вычислением нормали к касательной плоскости в исследуемой точке поверхности [75]. Для осуществления данной операции проводится анализ набора точек, соседних к исследуемой. Поиск соседних точек выполняется с помощью k-мерного дерева - структуры данных, представляющей собой двоичное дерево поиска, то есть такое дерево, для которого выполнены следующие условия [76]:

- Каждый узел обладает не более чем двумя потомками;
- Значения узлов левого поддерева для каждого узла меньше или равны значению самого узла;
- Значения узлов правого поддерева для каждого узла больше, чем значение самого узла;
- Любое поддерево также является двоичным деревом поиска.

Таким образом,  $k$ -мерное дерево хранит в себе упорядоченный набор точек, определяющий исследуемую поверхность. В данном случае, когда все операции проводятся в трёхмерном пространстве, дерево также является трёхмерным. Генерация  $k$ -мерного дерева на основе облака точек происходит следующим образом [77]. С каждым узлом дерева, не являющимся листом, ассоциирована гиперплоскость, которая разделяет пространство на два подпространства. В узле хранится информация о «разделяющей оси», перпендикулярно которой будет проходить гиперплоскость, а также «разделяющая координата», в которой гиперплоскость будет пересекать указанную ось. Все точки, координаты которых по разделяющей оси меньше или равны разделяющей координате, попадают в левое поддерево, остальные же попадают в правое поддерево.

В качестве разделяющей плоскости узла выбирается плоскость, содержащая ось, по которой распределение координат облака точек обладает наибольшей дисперсией, то есть ось, разброс точек по которой максимален. В качестве разделяющего значения же выбирается медиана - координата, разделяющая набор точек на равные, если это возможно, части. Такой выбор разделяющих плоскостей и координат в большинстве случаев позволяет получить максимально сбалансированное дерево, то есть такое, что путь от корня до каждого листа примерно одинаковый.

Для поиска точек по  $k$ -мерному дереву необходимо произвести обход как левого, так и правого поддерева, начиная с корня, при этом для каждого узла проводится проверка на пересечение искомой области и подпространств, образующихся в узле - при отсутствии пересечения необходимость в дальнейшем поиске по одному или обоим поддеревьям, исходящих из анализируемого в данный момент узла, отпадает. Вычислительная сложность данного алгоритма, при условии, что дерево сбалансировано, в лучшем случае равна  $O(\log N)$  и в худшем -  $O(N)$ , где  $N$  - количество точек во входном облаке.



Обладая множеством соседних точек, можно приступить к определению вектора нормали. Пусть  $\bar{p}$  - геометрический центр множества соседних точек, тогда, полагая, что

$$\bar{p} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k p_i \quad (1)$$

где  $k$  - количество соседних точек,  $p_i$  - соседняя точка, вектор нормали можно получить путём анализа собственных значений и собственных векторов ковариационной матрицы множества соседних точек  $P \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ :

$$C = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \xi_i \cdot (p_i - \bar{p}) \cdot (p_i - \bar{p})^T \quad (2)$$

где  $\xi_i$  - весовой коэффициент, в данном случае равный единице [77]. Полученная ковариационная матрица является симметричной положительно полуопределённой матрицей, собственные значения которой - вещественные числа. Число  $\lambda_i$  является собственным значением для квадратной матрицы  $C$ , если существует такой ненулевой вектор  $\bar{v}_i$ , что

$$C \cdot \bar{v}_i = \lambda_i \cdot \bar{v}_i \quad (3)$$

Собственные вектора  $\bar{v}_i$  составляют ортогональный базис, соответствующий главным компонентам множества анализируемых соседних точек. Главные компоненты определяют измерения с наибольшей дисперсией, при этом, чем больше соответствующее собственное значение компоненты, тем большей дисперсией обладает измерение данной компоненты [78]. В случае плоскости, находящейся в трёхмерном пространстве, наименьшей дисперсией обладает измерение, перпендикулярное плоскости. Так, для случая, изображённого на рисунке 2, третья главная компонента перпендикулярна двум первым главным компонентам, через которые проходит плоскость, аппроксимирующая

исходное облако точек. Тогда, если  $0 \leq \lambda_0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2$ , собственный вектор  $\overline{v_0}$ , соответствующий наименьшему собственному значению, является аппроксимацией искомого вектора нормали.

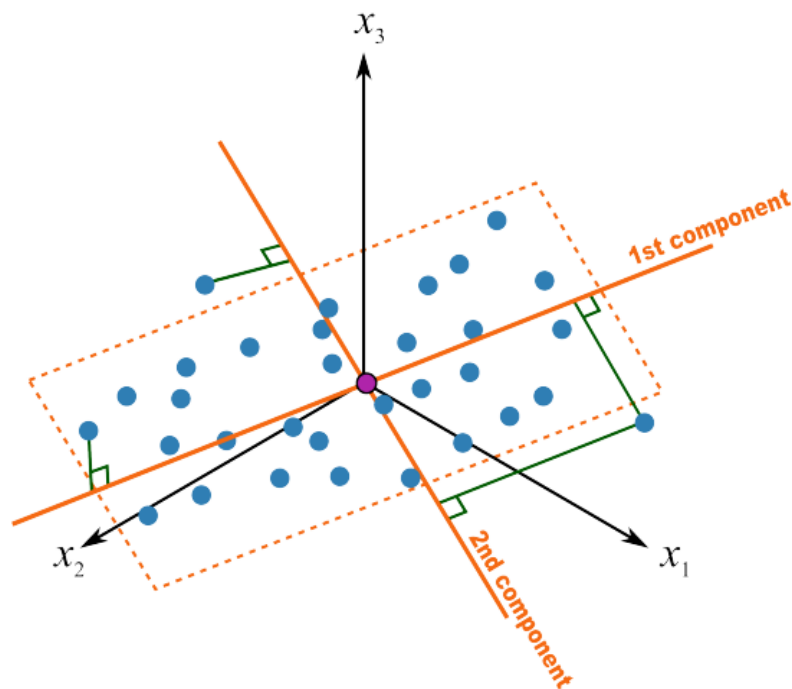


Рисунок 2. Две главные компоненты облака точек<sup>2</sup>.

### 2.3 Получение информации о физических свойствах поверхности

Результатом каждого контакта индентора с обследуемой поверхностью должна быть количественная оценка, на основе анализа которой специалист, а в перспективе - автономная робототехническая система, будет иметь возможность вынести диагноз или обнаружить участки ткани, вызывающие подозрение. Нездоровая ткань может отличаться от здоровой уровнем жёсткости, например, жёсткость раковой опухоли выше, чем жесткость здоровой ткани [79]. Общепринятой практикой является выражение уровня жесткости ткани через модуль Юнга, иногда также называемый модулем эластичности.

Согласно закону Гука, величина деформации прямопропорциональна испытываемому механическому напряжению:

<sup>2</sup> Источник изображения - [78].

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4)$$

где  $\sigma$  - механическое напряжение [Па] - прикладываемая сила, разделённая на площадь области взаимодействия,  $\varepsilon$  - относительная деформация (безразмерная величина) - отношение размера деформированного объекта к размеру до прикладывания силы, и  $E$  - модуль Юнга [Па]. Таким образом, модуль Юнга определяет способность материала противостоять внешнему напряжению и выражается как отношение механического напряжения к величине вызванной деформации [80]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5)$$

В случае, когда эластичная поверхность деформируется сферическим индентором (Рисунок 2), для расчёта модуля Юнга существует следующая формула [80]:

$$E = \frac{3 \cdot F \cdot (1 - \nu^2)}{4 \cdot d \cdot \sqrt{r \cdot d}} \quad (6)$$

где  $F$  - сила нормальной реакции опоры,  $\nu$  - коэффициент Пуассона - константа, характеризующая эластичные свойства материала, а именно - зависимость между продольными и поперечными деформациями [81],  $d$  - глубина вдавливания (Рисунок 3),  $r$  - радиус индентора (Рисунок 3). Формула 6 успешно использовалась в исследовании [52] для обнаружения областей повышенной или пониженной жёсткости.

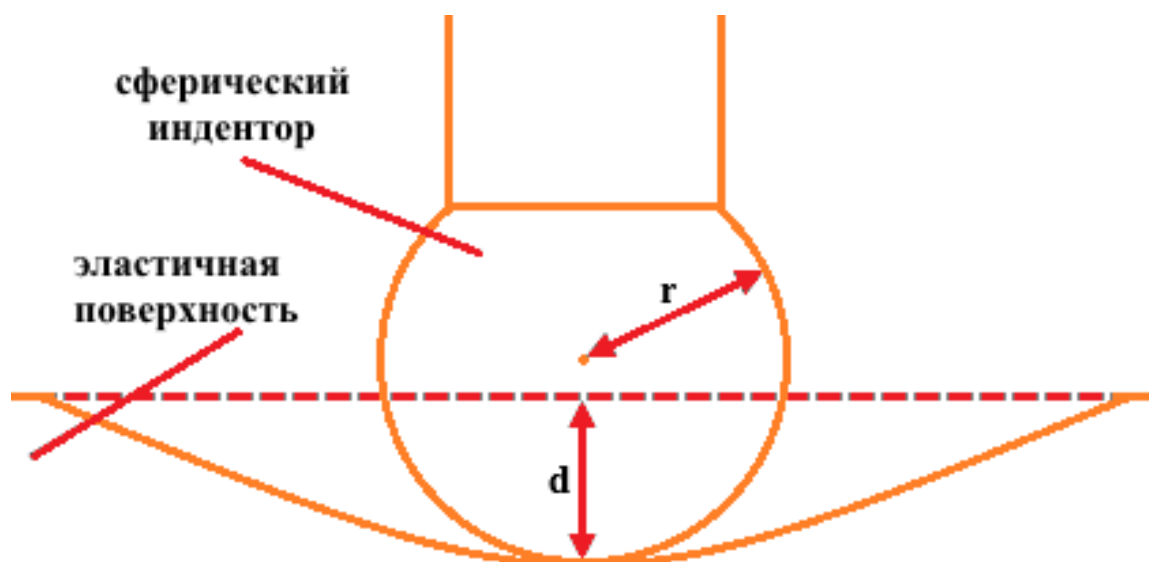


Рисунок 3. Вдавливание сферического индентора в эластичную поверхность.

#### 2.4 Обход поверхности

Под обходом поверхности, с точки зрения робототехнической пальпации, понимается процесс, когда рабочий орган манипулятора посещает определённый набор точек поверхности или движется по определённой траектории, проходящей по поверхности. При этом конечной целью обхода является покрытие как можно большей площади поверхности - это необходимо, чтобы не допустить ситуации, когда область, обладающая физическими характеристиками нездоровой ткани, пропускается.

Существующие варианты решения данной проблемы можно отнести к одному из трёх видов описанных далее. Статический обход, когда одна стратегия обхода поверхности сохраняется на протяжении всего процесса обследования; динамический обход, когда применяемая стратегия обхода предусматривает дополнительные активности в случае обнаружения аномальных областей; и адаптивный обход, когда траектория обхода полностью определяется на основе имеющейся на данный момент информации о тех или иных физических свойствах обследуемой поверхности.

Простейшим алгоритмом обхода поверхности является статический обход по точкам, когда поверхность представлена конечным числом точек, которые роботу необходимо посетить. После того, как точки определены, начинается процедура обхода, в ходе которой могут, к примеру, применяться такие методы обхода точек, как растровое сканирование или сканирование «змейкой». При этом рабочий орган робота находится в контакте с поверхностью лишь в точках, которые необходимо посетить.

Построив по вышеупомянутым точкам непрерывную траекторию, можно перейти к другому алгоритму, когда робот обходит поверхность по непрерывной траектории, при этом его рабочий орган находится в постоянном контакте с поверхностью. Таким образом, появляется возможность собрать намного больше сведений о физических характеристиках обследуемой поверхности, а также ускорить процедуру, так как пропадает необходимость во множественном прекращении и возобновлении контакта с поверхностью, чего не избежать в случае статического обхода по точкам. Однако при использовании данного алгоритма процесс управления роботом в случае работы с неплоской поверхностью значительно усложняется, так как непрерывное движение предусматривает необходимость учитывать любые неровности. Стоит отметить, что данный алгоритм может быть реализован и в виде частично непрерывного обхода, т.е. поверхность разбивается на отдельные области, в каждой из которых движение робота непрерывно.

Как обход по точкам, так и обход по непрерывным траекториям могут быть преобразованы в динамический вид. Среди возможных реакций на аномальные области в ходе динамического обхода можно выделить круговые движения в аномальной области или увеличение разрешения сканирования [23], то есть снижение пространственного шага между точками или участками траектории обхода таким образом, что количество и плотность проводимых измерений в данной области повышается. Адаптивные подходы

основаны на использовании техник машинного обучения, например Гауссовских процессов [31].

### 3 СИМУЛЯЦИЯ

Симуляция процедуры пальпации проходит в робототехническом симуляторе Gazebo, который предоставляет возможность гибкой настройки физических свойств, как робота, так и объектов окружающего мира, а также симулировать работу сенсоров. Далее описаны основные компоненты разработанной симуляции - манипулятор, окружение и пальпируемая поверхность, а также имплементация функционала по симуляции мягких объектов и их переменной жёсткости.

#### 3.1 Манипулятор

В качестве манипулятора, совершающего пальпацию, используется модель промышленного манипулятора общего назначения KUKA LBR IIWA [82] (Рисунок 4), которая полностью поддерживает запуск в симуляторе Gazebo, а также библиотеку MoveIt [83], что делает возможным имплементацию управления манипулятором через ROS(Robot Operation System - Робототехническая Операционная система) [84].

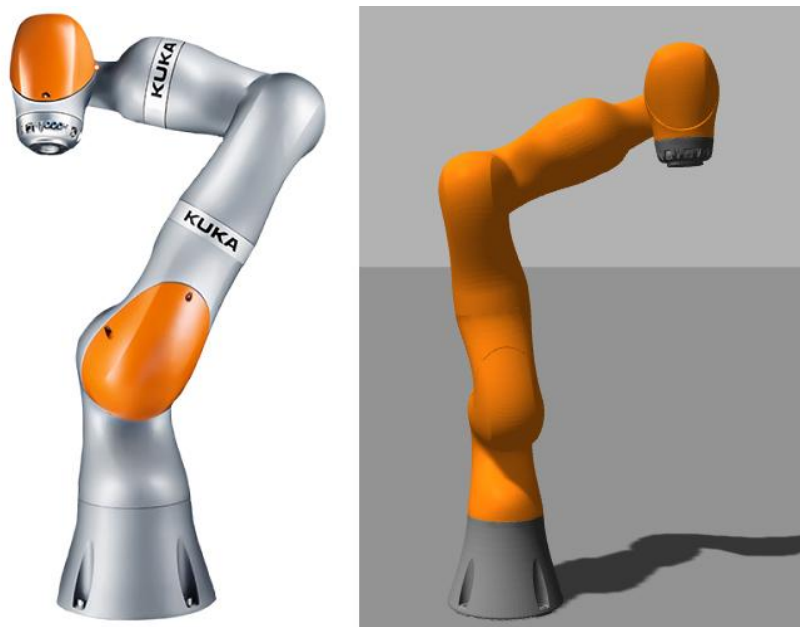


Рисунок 4. Слева - манипулятор KUKA LBR IIWA<sup>3</sup>, справа - его модель в симуляторе Gazebo.

---

<sup>3</sup> Источник изображения - [85].

KUKA LBR PWA - легковесный избыточный манипулятор с семью степенями свободы, разработанный специально для выполнения задач совместно с человеком [85]. Избыточность манипулятора, как было отмечено в исследовании [41], приводит к снижению инерции и трения в ходе процедуры пальпации. Данное свойство также позволяет манипулятору достигать цель несколькими способами, т.е. конфигурациями в пространстве. Это особенно важно в ходе пальпации, так как взаимодействие с человеческим телом накладывает ограничения на работу манипулятора. Возможность работать совместно с человеком также имеет большое значение, так как предполагается, что хирургическая робототехническая система, описываемая в данной работе, призвана лишь ассистировать настоящему врачу в сборе информации о физических свойствах пальпируемой поверхности, а не заменять его.

Оригинальная модель манипулятора была модифицирована путём добавления сферического индентора на цилиндрическом стержне (Рисунок 5). Существуют различные варианты формы инденторов, однако в данной работе была выбрана сферическая форма, так как, согласно [86], для мягких биологических тканей рекомендуется использовать сферическую форму, что позволяет прикладываемому давлению равномерно распределяться по зоне контакта, таким образом, предотвращая повреждение исследуемых тканей. Подобные типы рабочего органа успешно применялись в задачах робототехнической пальпации в исследованиях [23,31,57,67].



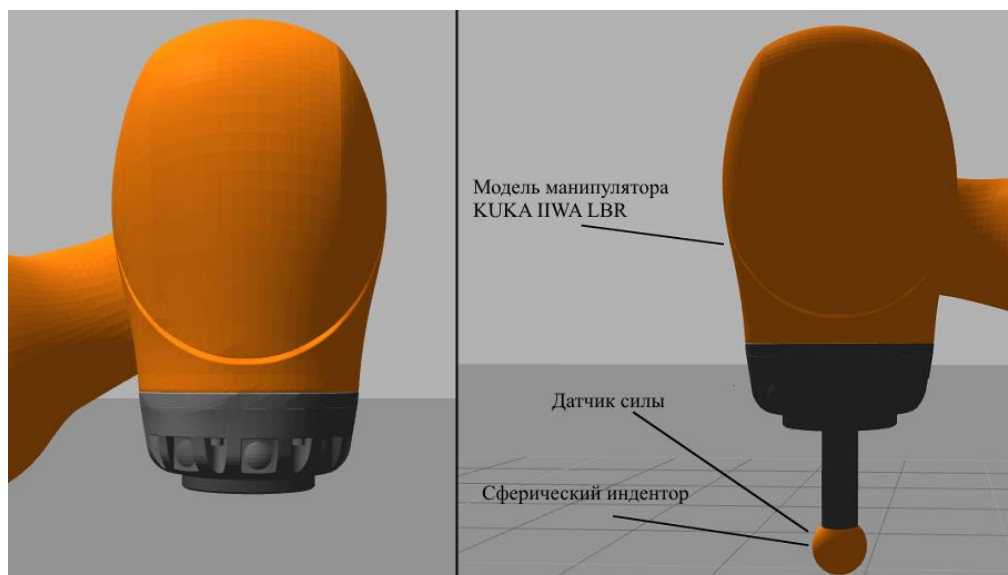


Рисунок 5. Слева - оригинальная модель манипулятора KUKA LBR IIWA, справа - модифицированная модель.

### 3.2 Симуляционное окружение

Симуляционное окружение (Рисунок 6) состоит из следующих компонент:

- модели хирургического стола, на котором располагается пальпируемый объект;
- поддерживающей платформы, на которой крепится манипулятор таким образом, что его рабочая область покрывает всю поверхность хирургического стола, а также пространство над столом;
- модели камеры Kinect с ROS-плагином времяпролётной камеры для оценки геометрических свойств пальпируемой поверхности;
- штатив, на котором располагается камера Kinect таким образом, чтобы быть направленной на поверхность хирургического стола.

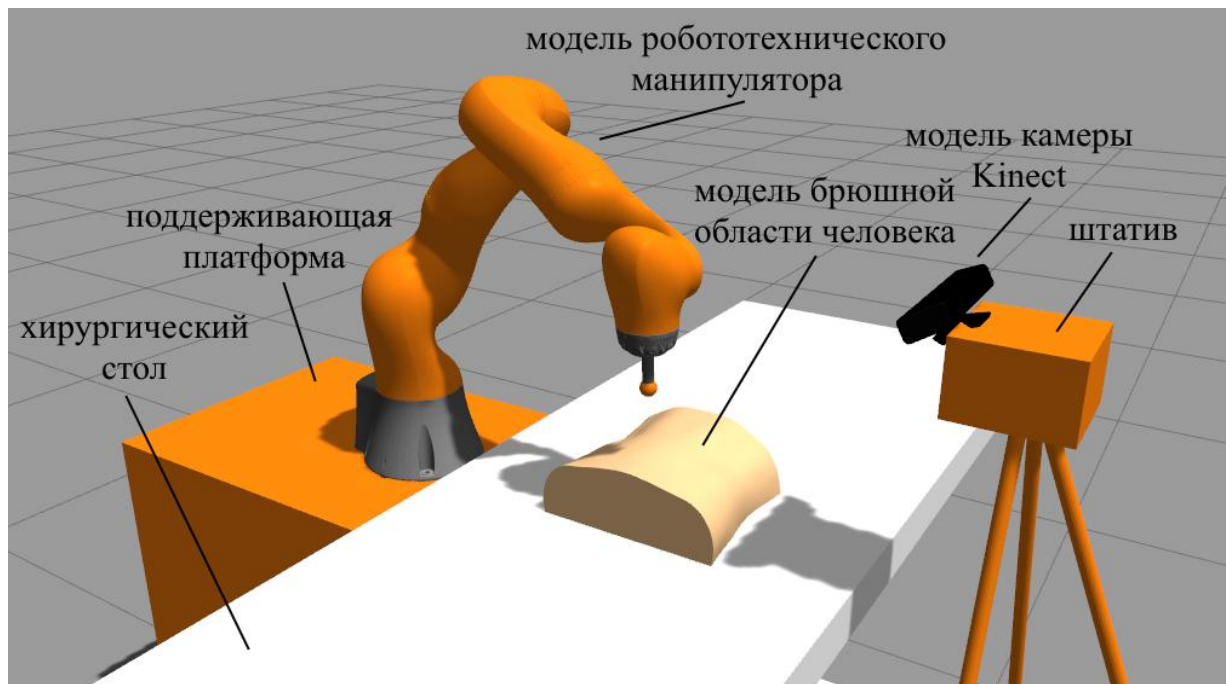


Рисунок 6. Симуляционное окружение.

Модели хирургического стола и штатива были специально созданы для симуляции, описываемой в данной работе, модели камеры Kinect и поддерживающей платформы являются встроенными в симулятор Gazebo.

Система способна проводить пальпацию поверхности произвольной геометрической формы при условии, что модель располагается на хирургическом столе и регион, подлежащий пальпации, попадает под область действия камеры Kinect. В качестве примера была использована модель брюшной области человеческого тела.

### 3.3 Симуляция мягких объектов

Во многих исследованиях, рассмотренных в главе «Обзор литературы», присутствует симуляция мягких объектов методом конечных элементов, однако данная модель в первую очередь направлена на анализ поведения и характеристик исследуемых поверхностей и объектов, а не роботов. Данный метод заключается в разбиении анализируемого исследуемого тела или поверхности на меньшие области, называемые конечными элементами, характеристики которых описываются простыми уравнениями, которые,

будучи рассмотренными совместно, способны аппроксимировать характеристики исходного физического объекта. Это освобождает исследователей от необходимости искать решения сложных дифференциальных уравнений, которые не всегда возможно получить [87].

Ввиду отсутствия поддержки симуляции эластичных поверхностей в симуляторе Gazebo, возникла необходимость внедрения данного функционала. Для этого был осуществлён переход со стандартного физического движка Gazebo ODE (Open Dynamics Engine) на физический движок DART (Dynamic Animation and Robotics Toolkit) [88], который также поддерживается симулятором и обладает необходимым функционалом. Для внедрения возможностей симуляции мягких объектов, предоставляемых физическим движком DART, в симулятор Gazebo, были внесены изменения в исходный код симулятора. Внесённые изменения нацелены на обеспечение:

- корректной обработки параметров мягких объектов движка DART, доступных в SDF (Simulation Description Format) спецификации модели;
- генерации коллизии, инерции и массы мягкого объекта, учитывая его твёрдые (кость) и мягкие (кожа/плоть) составляющие.

Имплементация симуляции мягких объектов движка DART основана на модели «масса на пружине», в которой мягкая поверхность объекта моделируется определённым набором точек массы, а эластичные силы, прикладываемые к каждой из точек, моделируются законом Гука [89]. Таким образом, для каждой точки массы, возникающая в результате деформации сила имеет следующий вид:

$$F = k \cdot \Delta x \quad (7)$$

где  $k$  - коэффициент жёсткости,  $\Delta x$  - величина деформации.

В физическом движке DART существуют методы автоматической генерации мягких объектов лишь для простых геометрических форм, таких как куб, шар или цилиндр. Аналогичного метода для создания мягкого объекта на основе произвольного меша не существует. Внедрённый в ходе данной работы функционал рассматривает каждую вершину меша модели как точку массы, таким образом, структура меша определяет число точек масс и их распределение. На рисунке 7 схематично изображена модель мягкого тела, сформированного на основе кубического меша: каждой вершине меша соответствует точка массы (Рисунок 7(а)), каждой грани меша соответствует пружина (Рисунок 7(б)). Для того чтобы получить стабильную информацию при помощи датчика силы, собирающего данные с мягкой поверхности, необходимо использовать меши с большим числом вершин. Это приводит к плотному и равномерному распределению точек масс по поверхности мягкого тела и гарантирует, что рабочий орган манипулятора будет взаимодействовать примерно с одним и тем же числом вершин и граней в ходе каждого контакта с поверхностью.

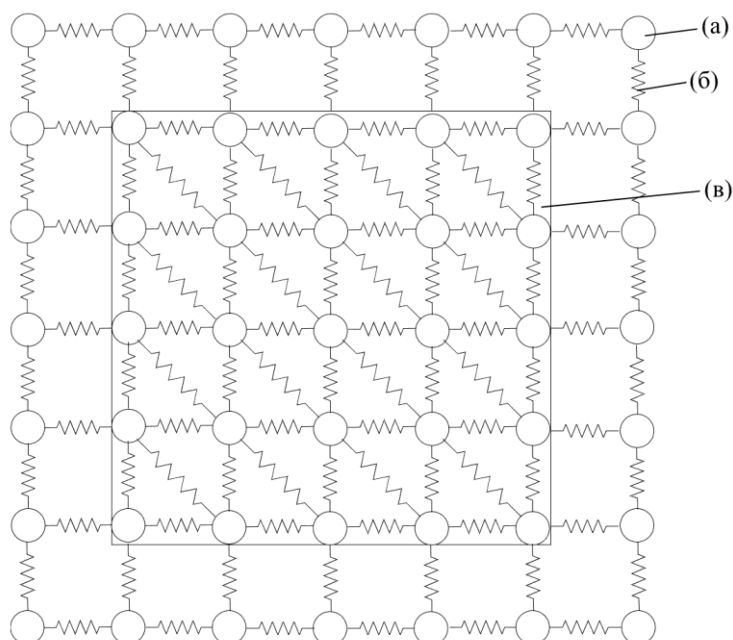


Рисунок 7. Модель мягкого тела, сформированного на основе кубического меша.

Для генерации твёрдой составляющей мягкого объекта (Рисунок 7(в)), которую покрывают точки массы, используется масштабирование исходной модели. На данный момент SDF спецификация позволяет задавать лишь долю массы мягкой составляющей тела - это значение было использовано для расчёта коэффициента масштабирования, таким образом, определяя распределение объёма тела между его мягкой и твёрдой составляющими.

Характеристики мягкого тела указываются в SDF описании модели. Доступно четыре параметра [90]:

- Жёсткость вершин и граней (поля `bone_attachment` и `stiffness_tags` в SDF) - определяют величину нормальных сил, возникающих в результате контакта с вершиной и гранью модели соответственно.
- Затухание (поле `damping` в SDF) - определяет затухание нормальных сил, возникающих в результате контакта мягкого тела и каким-либо другим телом.
- Доля массы плоти (поле `flesh_mass_fraction` в SDF) - определяет соотношение массы и объёма между мягкой (плоть/кожа) и твёрдой (кость) составляющими тела.

Для того чтобы протестировать внедрённые в Gazebo мягкие объекты, был разработан плагин датчика силы, который обращается за данными напрямую к физическому движку DART. Данный плагин был добавлен в линк, который использовался для тестирования путём касания поверхности и последующим считыванием значений нормальных сил, действующих на рабочий орган манипулятора, и его положения в ходе возникшего контакта. На графиках нормальной силы и положения (Рисунки 8(а) и 8(б) соответственно), построенных по полученным на мягких поверхностях измерениям, присутствуют осцилляции, характерные для эластичных поверхностей, в то время как на подобных графиках для случая твёрдого объекта (Рисунок 8(в) и 8(г)), являющимся стандартным для симулятора

Gazebo, осцилляции отсутствуют. Поверхность, с которой происходит контакт, расположена на высоте 1.0085 метров; как только происходит столкновение с твёрдой поверхностью, тело переходит в состояние покоя и неподвижно лежит на поверхности, в то время как в случае тестирования мягкого тела, несмотря на тот факт, что контакт происходит в момент времени, равный 0 секунд, что подтверждает резкий скачок значений на графике нормальных сил (Рисунок 8(а)), тело продолжает погружаться в мягкий объект (Рисунок 8(б)). График положения для мягкого объекта показывает, что тело способно погрузиться в мягкий объект на три миллиметра, прежде чем быть вытолкнутым в результате работы нормальных сил. После полного затухания осцилляций тело переходит в состояние покоя и остаётся погруженным в мягкую поверхность на глубину, примерно равную одному миллиметру.

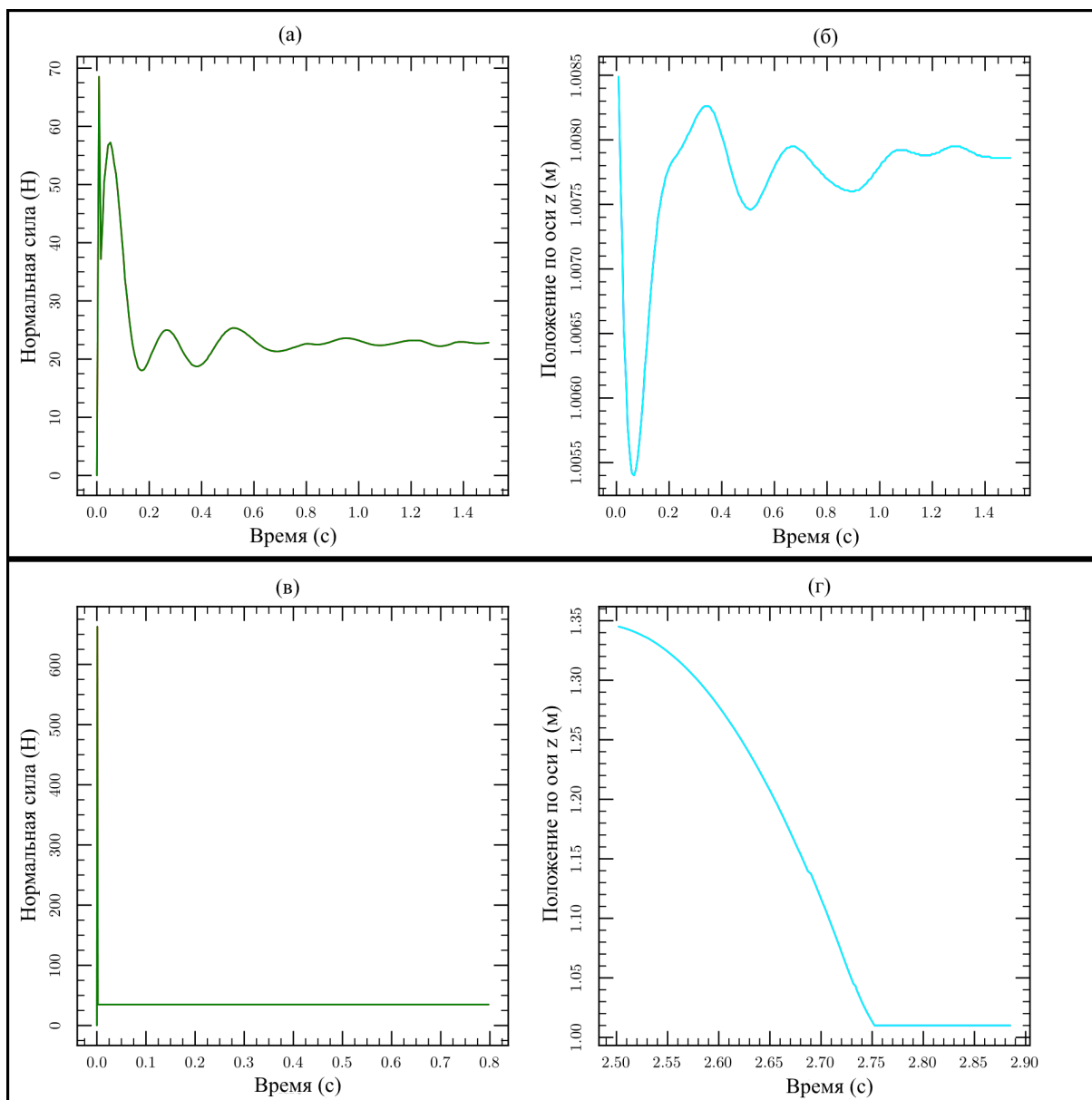


Рисунок 8. (а) и (в): Нормальная сила, действующая на тело со стороны мягкой и твёрдой поверхностей соответственно. (б) и (г): Положение тела по оси  $z$  в ходе контакта с мягкой и твёрдой поверхностями соответственно. Для графиков (а), (б) и (в) контакт с поверхностью происходит в момент времени 0 с, для графика (г) - в момент времени 2.75 с.

### 3.4 Симуляция переменной жёсткости

В то время как физический движок DART позволяет изменять параметры жёсткости всей модели мягкого тела, переменная жёсткость в пределах одной модели не поддерживается. Для того чтобы преодолеть данное ограничение, был разработан плагин для моделей симулятора Gazebo.

Трёхмерный интервал координат, соответствующих области повышенной жёсткости, которую необходимо симулировать, задаётся вручную. Как только рабочий орган манипулятора касается поверхности моделируемого мягкого объекта в пределах заданного интервала, плагин увеличивает жёсткость всей модели. Как только рабочий орган покидает данную зону, жёсткость модели уменьшается до обычного значения.



## 4 АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ПАЛЬПАЦИИ

Архитектура автономной робототехнической системы пальпации представлена на рисунке 9 и состоит из модуля обработки данных с камеры, модуля расчёта положений манипулятора и модуля управления манипулятором.

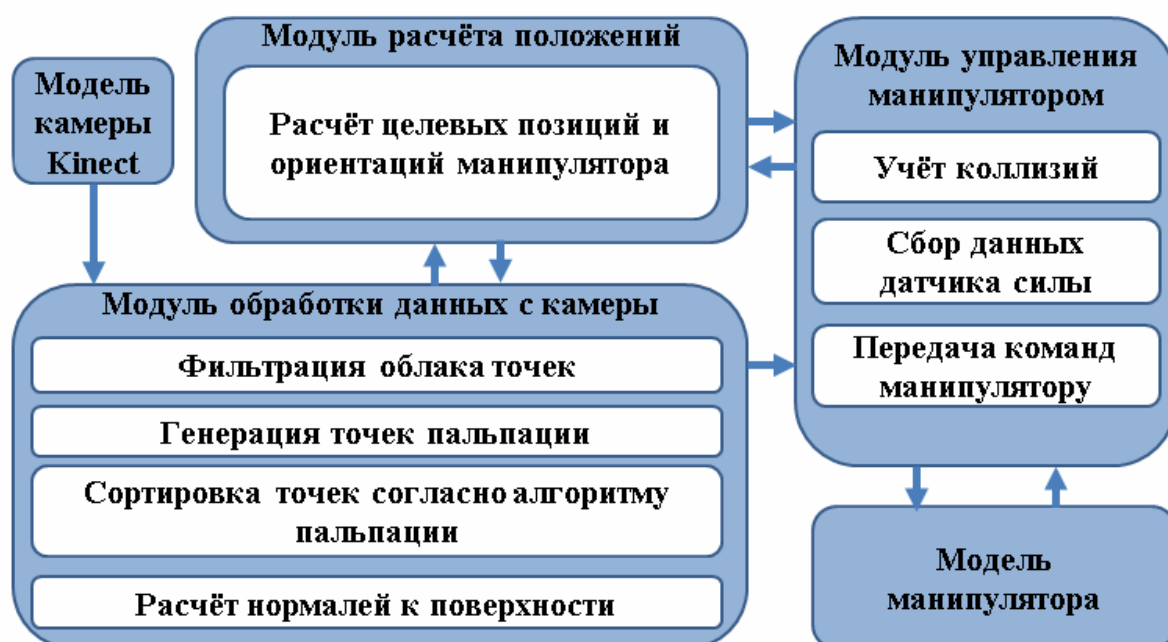


Рисунок 9. Архитектура автономной робототехнической системы пальпации.

### 4.1 Модуль обработки данных с камеры

Модуль обработки данных с камеры Kinect ответственен за этап получения информации о геометрических свойствах пальпируемой поверхности, теоретические аспекты которого описаны в разделе «Получение информации о геометрических свойствах поверхности» главы «Теоретические аспекты автономной пальпации». Работа модуля состоит из следующих этапов:

- получение облака точек при помощи модели камеры Kinect;

- перевод облака точек из системы координат камеры в глобальную систему координат, в которой проходит планирование движений манипулятора;
- удаление из облака точек «поврежденных» элементов, то есть таких, информацию о которых полностью или частично не удалось получить;
- пространственная фильтрация облака точек для удаления точек, лежащих вне области пальпации;
- генерация точек пальпации;
- сортировка точек пальпации согласно алгоритму покрытия пальпируемой поверхности;

Как только вышеперечисленные этапы работы модуля завершены, модуль управления манипулятором способен запрашивать информацию об очередной точке пальпации. Как только такой запрос совершён, модуль обработки данных с камеры вычисляет вектор нормали к поверхности в текущей точке пальпации (Рисунок 10) и предоставляет координаты точки и вектор нормали.

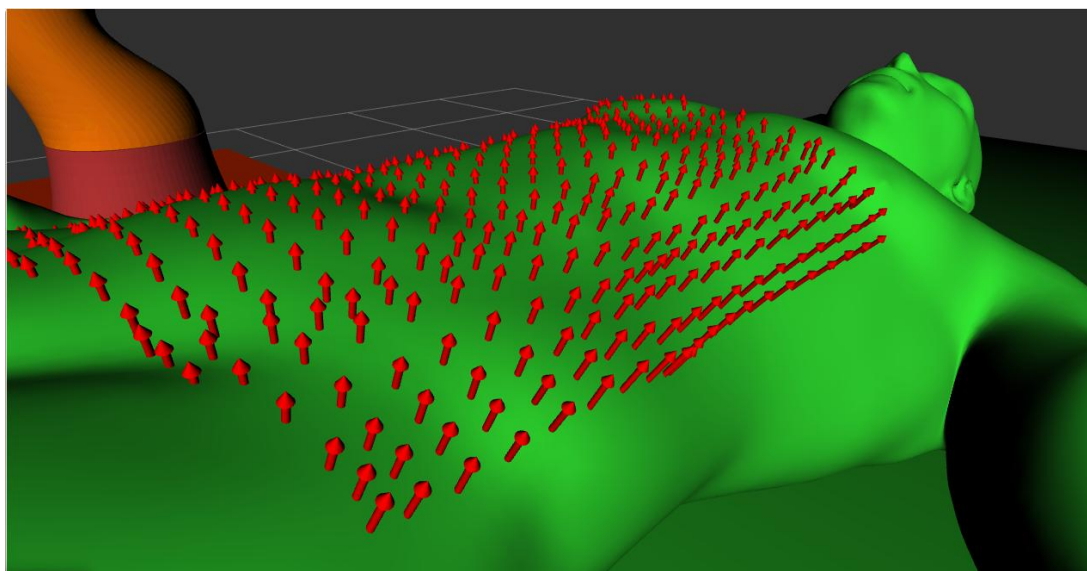


Рисунок 10. Нормали к поверхности человеческого тела, вычисленные в точках пальпации

## **4.2 Модуль расчёта положений**

Модуль расчёта положений используется тогда, когда необходимо вычислить позицию и ориентацию рабочего органа манипулятора. В описываемой системе существует два таких случая. Первый случай возникает, когда требуется преобразование позиции точки пальпации и вектора нормали к пальпируемой поверхности в этой точке в позицию и ориентацию рабочего органа манипулятора. Вторым случаем является вдавливание индентора, и рабочий орган манипулятора необходимо продвинуть глубже в пальпируемый мягкий объект.

В первом случае вектор нормали используется для расчёта матрицы поворота рабочего органа манипулятора с целью расположить его вдоль вектора, направленного противоположно вектору нормали к поверхности в текущей точке пальпации. Во втором случае положение рабочего органа манипулятора перемещается в направлении противоположном вектору нормали к поверхности в текущей точке пальпации, при этом ориентация рабочего органа не изменяется.

При возникновении необходимости в расчёте положения рабочего органа манипулятора, модули обработки данных с камеры и модуль управления манипулятором отправляют в модуль расчёта положений запросы, модуль расчёта положений делает необходимые расчёты и возвращает тому модулю, с которого был отправлен запрос, требуемые данные.

## **4.3 Модуль управления манипулятором**

Модуль управления манипулятором использует ROS (Robot Operating System) и фреймворк планирования движений MoveIt для управления манипулятором и учёта коллизий. Каждый раз, когда возникает необходимость изменить положение манипулятора, модуль производит

планирование движения и, если планирование успешно, передаёт манипулятору команду на исполнение движения.

Сканирование «змейкой» и непрерывное вдавливание (Рисунок 11) используются в качестве алгоритма обхода поверхности и техники пальпации, что согласуется с описанием процедуры, представленным в разделе «Медицинские аспекты пальпации» главы «Теоретические аспекты автономной пальпации», так как данная методика несёт в себе ключевые характеристики пальпации: систематичность, непрерывность и способность покрыть всю обследуемую поверхность. По сравнению с растровым сканированием и дискретным вдавливанием, данные техники приводят к более быстрому покрытию поверхности, так как отсутствует необходимость возвращать рабочий орган в начало растровой линии и производить вдавливание и отвод рабочего органа для каждой точки пальпации.

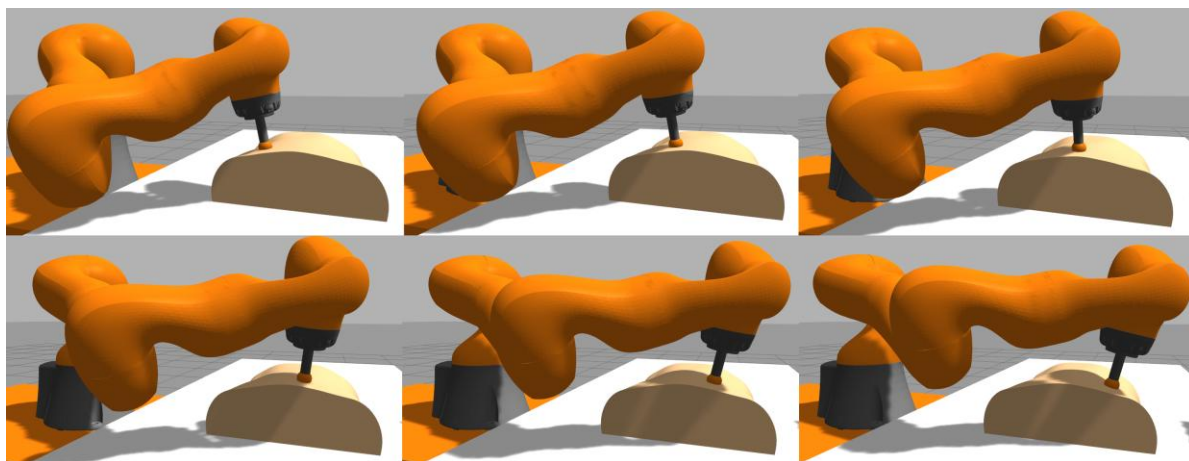


Рисунок 11. Пальпация различных точек мягкой модели.

Объекты коллизии включают в себя модели хирургического стола и человеческого торса. Модели камеры Kinect и штатива не учитываются, так как они расположены вне рабочей области манипулятора. Позиции и ориентации объектов коллизии модуль получает из сообщений, публикуемых в ходе симуляции Gazebo. Для того чтобы процедура пальпации стала возможна, коллизии между моделью человеческого торса и сферическим концевым инструментом манипулятора разрешены.

#### 4.4 Сбор данных

Было обнаружено, что датчик сил, использующийся в симуляторе Gazebo по умолчанию, не способен воспринимать изменения жёсткости внедрённых мягких поверхностей. Поэтому, вместо того, чтобы измерять силы, действующие на соединительный узел, как это происходит в плагине датчика сил по умолчанию, был разработан новый плагин датчика сил, который получает данные из информации о коллизиях между рабочим органом манипулятора и пальпируемой поверхностью, напрямую обращаясь к информации, предоставляемой физическим движком DART. Разработанный плагин датчика был встроен в рабочий орган робототехнического манипулятора (Рисунок 5), описанный в разделе «Манипулятор» главы «Симуляция».

В ходе пальпации собираются значения нормальной силы. Как было показано в исследованиях [43] и [50], это единственная сила, вносящая существенный вклад при определении жёсткости пальпируемого объекта. Чтобы добиться систематичности и согласованности сбора данных, нормальная сила для каждой точки контакта с поверхностью определяется при положении рабочего органа манипулятора перпендикулярно поверхности и при вдавливании на одинаковую глубину.

Как указано в формуле 7, существует прямая зависимость между жёсткостью точки массы и силой, возникающей в результате деформации точки массы. Таким образом, как и в исследовании [29], предполагается, что информации о нормальной силе достаточно для выявления различий между мягкими телами с различной жёсткостью при условии, что в ходе измерений рабочий орган манипулятора расположен перпендикулярно поверхности и вдавливается на одинаковую глубину. Это предположение подкрепляется формулой 6 - при неизменных значениях глубины вдавливания и радиуса индентора, значение эластичности зависит лишь от величины нормальной силы.

## 5 РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ

При помощи автономной робототехнической системы, представленной выше, была проведена процедура пальпации модели брюшной области человеческого тела, которая симулировалась как мягкий объект с переменной жёсткостью согласно разделам «Симуляция мягких объектов» и «Симуляция переменной жёсткости» главы «Симуляция».

Данные, собранные в ходе пальпации, содержат информацию о положениях точек в трёхмерном пространстве и нормальных силах, измеренных манипулятором в этих точках. Вследствие беспорядочности изначальных данных, проводится операция аппроксимации поверхности путём интерполяции необработанных данных. Для этой цели был написан скрипт в среде MATLAB. Аппроксимированная поверхность предоставляет визуальное и количественное представление распределения нормальной силы по пальпируемой поверхности, однако, информация о положении становится двумерной - все точки пальпации проецируются на плоскость.

Результирующий график распределения нормальной силы по поверхности представлен на рисунке 12. Область повышенной жёсткости в нижнем правом квадранте обследованной брюшной области чётко различима, а значения нормальных сил в данной области превышают значения для всей остальной поверхности модели, что подтверждает предположение, сделанное в разделе «Сбор данных» главы «Автономная робототехническая система». Как видно из рисунка 13, на котором показано соотношение результата пальпации, представленного в виде графика (Рисунок 13, справа), и мягкой модели брюшной области с повышенной жёсткостью в области правого нижнего квадранта (Рисунок 13, слева), область повышенной жёсткости была определена верно.

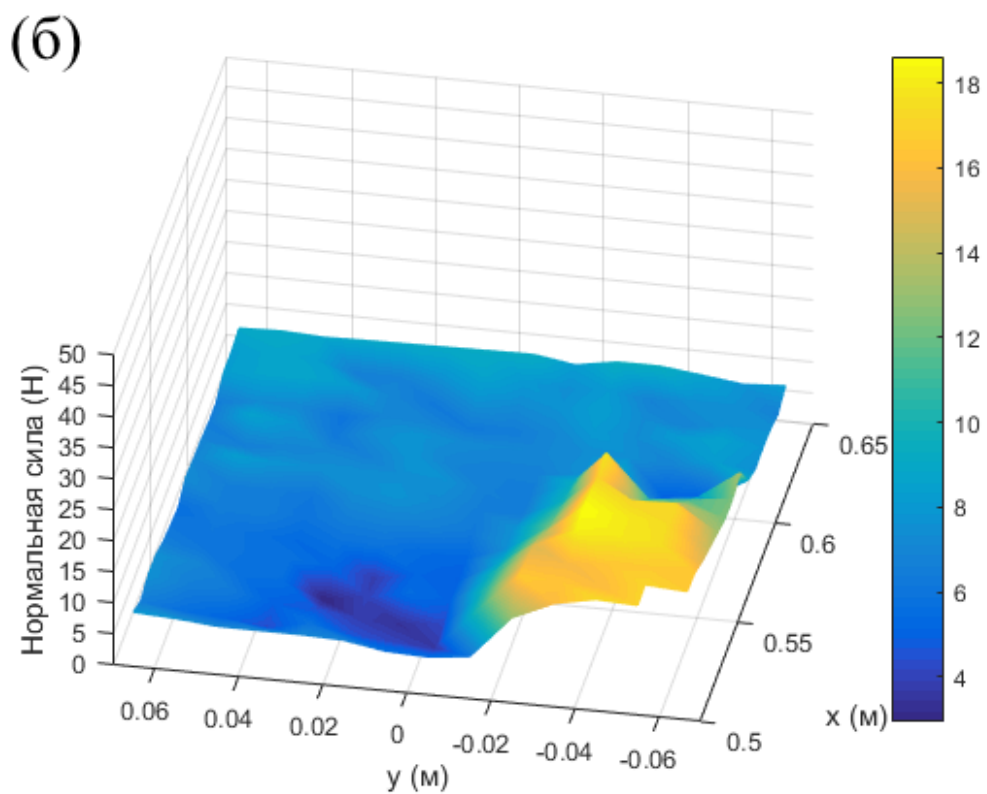
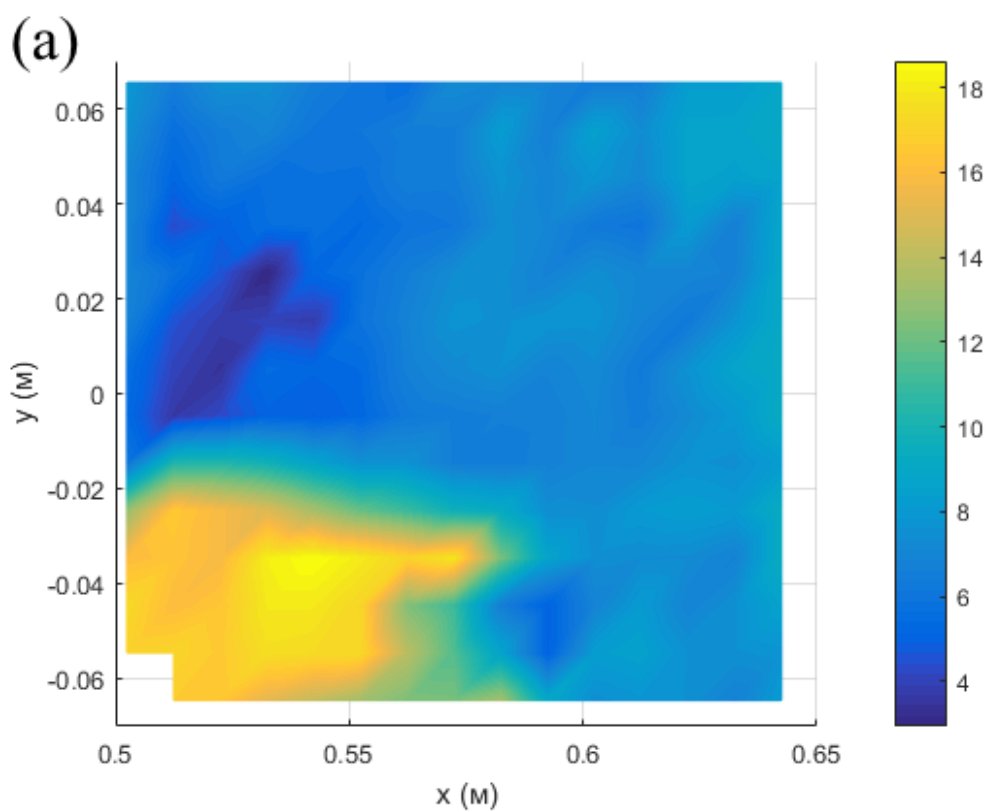


Рисунок 12. Распределение нормальных сил по пальпируемой поверхности с переменной жёсткостью: (а) двумерный вид и (б) трёхмерный вид.

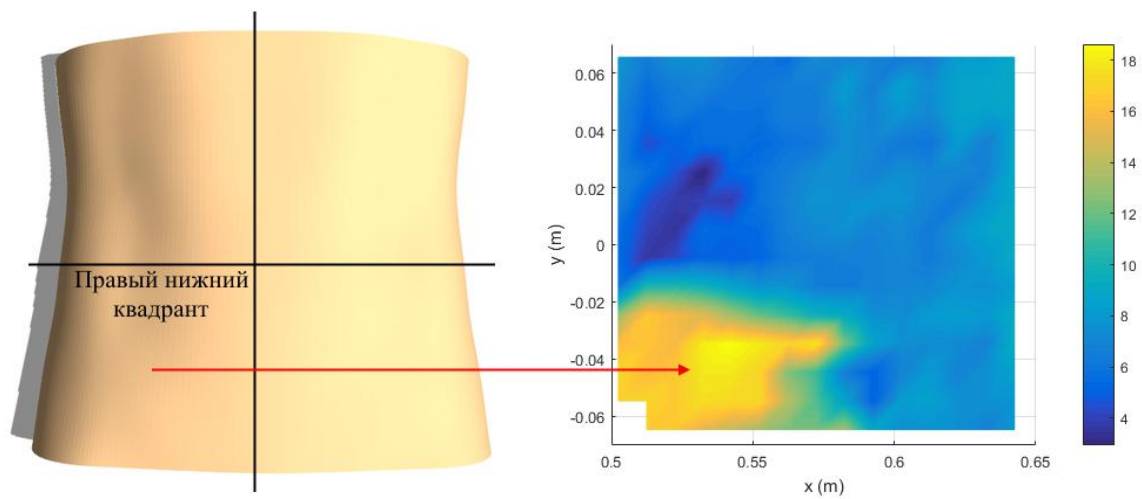


Рисунок 13. Связь модели брюшной области и результата пальпации.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обзор литературы, содержащий анализ множества исследований, сделанных за последние несколько лет, а также некоторых более ранних работ, позволил выявить как тенденции в развитии области робототехнической пальпации, так и пробелы, существующие в исследовании данной темы. Прежде всего, ни в одном из рассмотренных источников не была реализована симуляция работы робота, которая позволила бы проанализировать поведение робота и обнаружить недостатки его работы. Также стоит отметить недостаток исследований в области обхода и анализа неплоских поверхностей при обилии исследований в области обхода и анализа плоских поверхностей, что является значительно менее сложной задачей. Новейшие же исследования по данному направлению активно используют техники машинного обучения, при этом альтернативные варианты развиваются значительно слабее, чего нельзя сказать об области, связанной с получением характеристик пальпируемой поверхности, в которой существует множество различных направлений. Необходимо также подчеркнуть, что большинство исследований в области робототехнической пальпации направлены на решение проблем малоинвазивной хирургии, а не общей пальпации человеческого тела [91]. В первую очередь, на это повлияло существование робототехнической хирургической системы Da Vinci, которая специализируется на хирургических операциях, в том числе и на малоинвазивных. Ещё одним фактором, повлиявшим на высокую степень исследовательской активности в области робототехнической пальпации для малоинвазивной хирургии, является возможность взаимодействия со внутренними органами человека, предоставляющими широкий спектр возможных патологий, которые во многих случаях не могут быть обнаружены в ходе поверхностной пальпации.

Была разработана модель автономной робототехнической системы для медицинской пальпации, основанная на модели робототехнического

манипулятора, которая была модифицирована с целью обеспечения стабильного контакта с пальпируемой поверхностью и возможности сбора данных. Этого удалось достичь путём моделирования нового рабочего органа, выполняющего роль индентора, который также был снабжён специально разработанным для данной системы плагином датчика сил. В качестве собираемых данных использовались значения нормальной силы, получаемые при помощи плагина датчика силы, специально разработанного для данной системы. Система использует данные с модели камеры Kinect для того, чтобы сгенерировать точки пальпации на обследуемой поверхности. Планирование и выполнение движений манипулятора реализовано при помощи библиотеки ROS и программного интерфейса, предоставляемого фреймворком планирования движений MoveIt.

Для того чтобы осуществить симуляцию процедуры пальпации, в робототехнический симулятор Gazebo был внедрён новый функционал, позволяющий симулировать мягкие объекты. Имплементация основана на модели деформируемых объектов «масса на пружине» и использует функционал, предоставляемый физическим движком DART, который поддерживается симулятором Gazebo. Вследствие отсутствия возможности у физического движка DART симулировать различную жёсткость в пределах одного мягкого объекта был разработан плагин для модели Gazebo, предоставляющий данный функционал.

Проведённые в симуляции эксперименты показали, что разработанная автономная робототехническая система в ходе пальпации поверхности мягкого объекта способна различать области различной жёсткости, успешно симулируемые благодаря новому внедрённому функционалу.

Разработки, представленные в данной работе, обладают несколькими недостатками, что предоставляет возможность для дальнейшего совершенствования проекта:

- автономная робототехническая система, представленная в данной работе, направлена на получение лишь тактильной информации в ходе пальпации - визуальный аспект, который также присутствует при обследовании определённых частей тела, не учитывается;
- текущая реализация симуляции мягких объектов не оптимизирована с точки зрения производительности, что приводит к крайне низкому показателю фактора реального времени симуляции;
- корректная симуляция мягких объектов доступна лишь для относительно простых с точки зрения геометрической формы моделей: вследствие масштабирования, используемого в качестве метода формирования мягкой поверхности и твёрдой основы модели, любая чрезмерно выступающая часть модели будет подвержена смещению;
- модель, используемая для симуляции мягких объектов не обладает анатомической правдоподобностью, поэтому соотношение доступных параметров с характеристиками реальных тканей человеческого организма недоступно;
- текущая имплементация симуляции мягких объектов лишена возможности визуализации деформаций.

Результаты работы были также представлены на международной конференции по искусственной жизни и робототехнике (International Conference on Artificial Life and Robotics 2020 - ICAROB 2020) [92] и в готовящейся к публикации статье для конференции по развитию в области разработок цифровых систем (Developments in eSystems Engineering 2020 - DeSE 2020).

Исходный код работы размещен по ссылке  
<http://gititis.kpfu.ru/arturShafikov/autonomous-robotic-palpation-system-modelling>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhou J. Overview of Medical Robot Technology Development / J. Zhou, X. Ma, Z. Xu [и др.]// 2018 37th Chinese Control Conference (CCC). - 2018. - С. 5169-5174
2. Annual Reports: сайт / Intuitive Surgical Inc. - URL: <http://www.annualreports.com/Company/intuitive-surgical-inc> (дата обращения: 05.06.2020).
3. The Gale Encyclopedia of Medicine / Под ред. J.L. Longe, D.S. Blanchfield - 2-е изд. - Detroit, MI: Cengage Learning, 2001. - 3500 с.
4. Jarvis C. Pocket Companion for Physical Examination and Health Assessment / C. Jarvis. - St. Louis, Missouri: Elsevier Health Sciences, 2015. - 307 с.
5. Clinical Surgery / A. Cuschieri, P.A. Grace, A. Darzi [и др.] - 2-е изд. - Malden, Mass.: Wiley-Blackwell, 2003. - 832 с.
6. Kato I. The Automatic Breast-cancer Palpation Robot : Wapro-4r / I. Kato, K. Kogenazawa, H. Fujimoto [и др.] // IEEE International Workshop on Intelligent Robots. - 1988. - С. 73-78.
7. Koenig N. Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator / N. Koenig, A. Howard // 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566). - 2004. - №3. - С. 2149–2154.
8. Sagitov A. Toward automated open wound suturing using haptic feedback: detecting wounds and planning the suture / A. Sagitov, H. Li, E. Magid // The 2018 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2018). - 2018. - С. 208–211.
9. Sagitov A. Automated open wound suturing: detection and planning algorithm / A. Sagitov, T. Tsoy, H. Li, E. Magid // Journal of Robotics, Networking and Artificial Life. - 2018. - №2. - С. 144-148.
10. Sagitov A. Extending Gazebo simulator for surgical robotics: tissue and suture modeling / A. Sagitov, H. Li, N. Schiefermeier-Mach, E. Magid // The 2019

- International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2019). - 2019. - С. 124-127.
11. Sokolov M. Modelling a crawler-type UGV for urban search and rescue in Gazebo environment / I. Afanasyev, R. Lavrenov, A. Sagitov [и др.] // Proceedings of International Conference on Artificial Life and Robotics. - 2017. - С. 360-363.
  12. Imameev D. Modelling Autonomous Parallel Parking Procedure for Car-like Robot Aurora Unior in Gazebo Simulator / D. Imameev, K. Shabalina, A. Sagitov [и др.] // The 2020 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2020). - 2020. - С. 428-431.
  13. Abbyasov B.. Automatic tool for Gazebo world construction: from a grayscale image to a 3D solid model / B. Abbyasov, R. Lavrenov, A. Zakiev [и др.] // 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). - 2020. - С. 7226-7232.
  14. Khusnutdinov K. Household Objects Pick and Place Task for AR-601M Humanoid Robot / K. Khusnutdinov, A. Sagitov, A. Yakupov [и др.] // 2019 International Conference on Interactive Collaborative Robotics (ICRA). - 2019. - С. 139-149.
  15. Lavrenov R. Development and Implementation of Spline-based Path Planning Algorithm in ROS/Gazebo Environment / R. Lavrenov, E. Magid, M. Fumitoshi [и др.] // SPIIRAS Proceedings. - 2019. - №1. - С. 57-84.
  16. Moskvina I. Modelling a Crawler Robot Using Wheels as Pseudo-Tracks: Model Complexity vs Performance / I. Moskvina, R. Lavrenov, E. Magid, M. Svinin // 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA). - 2020. - С. 1-5.
  8. Li E.C. Surface Tracking with Robot Force Control in Unknown Environment / E.C. Li, Z.M. Li // Advanced Materials Research. - 2011. - С. 2140–2143.
  9. Song P. Impedance Control of Robots: An Overview / P. Song, Y. Yu, X. Zhang // 2017 2nd International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC). - 2017. - С. 51–55.

10. Hess J. Null space optimization for effective coverage of 3D surfaces using redundant manipulators / J. Hess, G.D. Tipaldi, W. Burgard // 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. - 2012. - С. 1923–1928..
11. The Traveling Salesman Problem and Its Variations / Под ред. G. Gutin, A.P. Punnen - Boston, MA: Springer US, 2007. - 749 с.
12. Chi H. A Discussions on the Least-Square Method in the Course of Error theory and Data Processing / H.Chi // 2015 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN). - 2015. - С. 486–489.
13. Ganesh G. A versatile biomimetic controller for contact tooling and haptic exploration / G. Ganesh, N. Jarrassé, S. Haddadin [и др.] // 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. - 2012. - С. 3329-3334.
14. Goldman R.E. Algorithms for autonomous exploration and estimation in compliant environments / R.E. Goldman, A. Bajo, N. Simaan. // Robotica. Cambridge University Press. - 2013. - №1. - С. 71–87.
15. Mihai L.A. How to characterize a nonlinear elastic material? A review on nonlinear constitutive parameters in isotropic finite elasticity / L.A. Mihai, A. Goriely // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. Royal Society. - 2017. - №2207.
16. Back J. Control a contact sensing finger for surface haptic exploration / J. Back, J. Bimbo, Y. Noh [и др.] // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). - 2014. - С. 2736-2741.
17. Konstantinova J. Behavioral characteristics of manual palpation to localize hard nodules in soft tissues / J. Konstantinova, M. Li, G. Mehra [и др] // IEEE transactions on bio-medical engineering. - 2014. - №6. - С. 1651-1659.
18. Nichols K.A. Methods to Segment Hard Inclusions in Soft Tissue During Autonomous Robotic Palpation / K.A. Nichols, A.M. Okamura // IEEE Transactions on Robotics. - 2015. - №2. - С. 344–354.

19. Kim Y.B. Exploration and reconstruction of unknown object by active touch of robot hand / Y.B. Kim, G. Kang, G.K. Yee [и др] // Intelligent Service Robotics. - 2015. - №3. - С. 141-149.
20. Chalasani P. Concurrent nonparametric estimation of organ geometry and tissue stiffness using continuous adaptive palpation / P. Chalasani, L. Wang, R. Roy [и др.] // 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). - 2016. - С. 4164-4171.
21. Matsubara T. Active touch point selection with travel cost in tactile exploration for fast shape estimation of unknown objects / T. Matsubara, K. Shibata, K. Sugimoto // 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). - 2016. - С. 1115–1120.
22. Garg A. Tumor localization using automated palpation with Gaussian Process Adaptive Sampling / A. Garg, S.Sen, R. Kapadia [и др] // 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). - 2016. - С. 194-200.
23. Martinez-Hernandez U. Active sensorimotor control for tactile exploration / U. Martinez-Hernandez, T.J. Dodd, M.H. Evans [и др.] // Robotics and Autonomous Systems. - 2017. - №87. - С. 15-27.
24. Ayvali E. Utility-Guided Palpation for Locating Tissue Abnormalities / E. Ayvali, A. Ansari, L. Wang [и др] // IEEE Robotics and Automation Letters. - 2017. - №2. - С. 864-871.
25. Driess D. Active learning with query paths for tactile object shape exploration / D. Driess, P. Englert, M. Toussaint // 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). - 2017. - С. 65–72.
26. Salman H. Trajectory-Optimized Sensing for Active Search of Tissue Abnormalities in Robotic Surgery / H. Salman, E. Ayvali, R.A. Srivatsan // 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). - 2018.
27. Xu W. Human Palpation Behavior Modeling with Mixture Models: Towards Autonomous Robotic Palpation / W. Xu, J. Guo, H. Ren. // 2018 3rd



- International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM). - 2018. - С. 756–761.
28. Zevallos N. A surgical system for automatic registration, stiffness mapping and dynamic image overlay / N. Zevallos, R.A. Srivatsan, H. Salman [и др.] // 2018 International Symposium on Medical Robotics (ISMR). - 2018.
29. Talasaz A. Integration of force reflection with tactile sensing for minimally invasive robotics-assisted tumor localization / A. Talasaz, R.V. Patel // IEEE Transactions on Haptics. - 2013. - №2. - С. 217–228.
30. Karadogan E. A stiffness discrimination experiment including analysis of palpation forces and velocities / E. Karadogan, R.L. Williams, J.N. Howell [и др.] // Simulation in Healthcare: Journal of the Society for Simulation in Healthcare. - 2010. - №5. - С. 279–288.
31. Konstantinova J. Evaluating Manual Palpation Trajectory Patterns in Tele-manipulation for Soft Tissue Examination / J. Konstantinova, M. Li, V. Aminzadeh [и др.] // 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. - 2013. - С. 4190-4195.
32. Torabi A. Application of a Redundant Haptic Interface in Enhancing Soft-Tissue Stiffness Discrimination / A.Torabi, M. Khadem, K. Zareinia [и др.] // IEEE Robotics and Automation Letters. - 2019. - №2. - С. 1037-1044.
33. Abiri A. Artificial palpation in robotic surgery using haptic feedback / A. Abiri, Y. Juo, A. Tao [и др.] // Surgical Endoscopy. - 2019. - №4. - С. 1252-1259.
34. Liu H. Rolling Mechanical Imaging for Tissue Abnormality Localization During Minimally Invasive Surgery / H. Liu, D.P. Noonan, B.J. Challacombe [и др.] // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. - 2010. - №2. - С. 404-414.
35. Hoshi T. Quantitative palpation to identify the material parameters of tissues using reactive force measurement and finite element simulation / T. Hoshi, Y. Kobayashi, T. Miyashita [и др.] // 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. - 2010. - С. 2822-2828.

36. Kobayashi Y. Palpation nonlinear reaction force analysis for characterization of breast tissues / Y. Kobayashi, M. Tsukune, T. Hoshi [и др.] // Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society.. - 2011. - С. 7393-7396.
37. Gwilliam J.C. Human vs. robotic tactile sensing: Detecting lumps in soft tissue / J.C. Gwilliam, Z. Pezzementi, E. Jantho [и др.] // 2010 IEEE Haptics Symposium. - 2010. - С. 21-28.
38. Frank B. Learning the elasticity parameters of deformable objects with a manipulation robot / B. Frank, R. Schmedding, C. Stachniss [и др.] // 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. - 2010. - С. 1877-1883.
39. Time-of-Flight Cameras: Principles, Methods and Applications / M. Hansard, S. Lee, O. Choi, R.P. Horaud, - London: Springer-Verlag, 2013. - 103 с.
40. Lee J.W. Palpation device for the identification of kidney and bladder cancer: a pilot study / J.W. Lee, E.I.S. Lorenzo, B. Ahn [и др.] // Yonsei Medical Journal. - 2011. - №5. - С. 768-772.
41. Ahn B. Robotic palpation and mechanical property characterization for abnormal tissue localization / B. Ahn, Y. Kim, C.K. Oh [и др.] // Medical & Biological Engineering & Computing. - 2012. - №9. - С. 961-971.
42. Lee H. Localization of abnormality using finite element modeling of prostate glands with robotic system: A preliminary study / H. Lee, Y. Kim, Y.K. Shin [и др.] // 2012 4th IEEE RAS EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). - 2012. - С. 889-893.
43. Wanninayake I.B. Estimation of tissue stiffness using a prototype of air-float stiffness probe / I.B. Wanninayake, L.D. Seneviratne, K. Althoefer // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). - 2014. - С. 1426–1431.

44. Kwon J.H. Enhanced tactile sensor for the minimally invasive robotic palpation / J.H. Kwon, J.H. Hwang, J. An [и др.] // 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. - 2014. - С. 1375-1380.
45. McKinley S. A single-use haptic palpation probe for locating subcutaneous blood vessels in robot-assisted minimally invasive surgery / S. McKinley, A. Garg, S. Sen [и др.] // 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). - 2015. - С. 1151-1158.
46. Srivatsan R.A. Complementary model update: A method for simultaneous registration and stiffness mapping in flexible environments / R.A. Srivatsan, E. Ayvali, L. Wang [и др.] // 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). - 2016. - С. 924-930.
47. Konstantinova J. Autonomous robotic palpation of soft tissue using the modulation of applied force / J. Konstantinova, G. Cotugno, P. Dasgupta [и др.] // 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). - 2016. - С. 323-328.
48. Konstantinova J. Palpation force modulation strategies to identify hard regions in soft tissue organs / J. Konstantinova, G. Cotugno, P. Dasgupta [и др.] // PLOS ONE. - 2017. - №2.
49. Hui J.C.T. Robust tactile perception of artificial tumors using pairwise comparisons of sensor array readings / J.C.T. Hui, A.E. Block, C.J. Taylor [и др.] // 2016 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS). - 2016. - С. 305-312.
50. Sornkarn N. Can a Soft Robotic Probe Use Stiffness Control Like a Human Finger to Improve Efficacy of Haptic Perception? / N. Sornkarn, T. Nanayakkara // IEEE Transactions on Haptics. - 2017. - №2. - С. 183–195.
51. Herzig T. A Variable Stiffness Robotic Probe for Soft Tissue Palpation / T. Herzig, P. Maiolino, F. Iida [и др.] // IEEE Robotics and Automation Letters. - 2018. - №2. - С. 1168-1175.
52. Faragasso A. Real-Time Vision-Based Stiffness Mapping / A. Faragasso, J. Bimbo, A. Stilli [и др.] // Sensors. - 2018. - №5.

53. Chalasani P. Preliminary Evaluation of an Online Estimation Method for Organ Geometry and Tissue Stiffness / P. Chalasani, L. Wang, R. Yasin [и др.] // IEEE Robotics and Automation Letters. - 2018. - №3. - С. 1816-1823.
54. Ju F. A Variable-Impedance Tactile Sensor With Online Performance Tuning for Tissue Hardness Palpation in Robot-Assisted Minimally Invasive Surgery / F. Ju, Y. Yun, Z. Zhang [и др.] // Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. - 2018. - С. 2142-2145.
55. Wijayarathne L. Force Feedback-Enabled Dexterous Robotic Micromanipulation Platform for Surgical Tasks / L. Wijayarathne, B. Blaise, D. Ward [и др.] // 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). - 2018.
56. Yang Y. Surface Model Extraction from Indentation Curves of Hyperelastic Simulation for Abnormality Detection / Y. Yang, K.L. Yung, R.T.W. Hung [и др.] // 2019 International Symposium on Medical Robotics (ISMR). - 2019. - С. 1-7.
57. Li C. A Convex Tactile Sensor for Isotropic Tissue Elastic Modulus Estimation Based on the Plane Contact Model / C. Li, D. Yan, J. Shen // IEEE Sensors Journal. - 2019. - №15. - С. 6251–6259.
58. Guo J. Compensating Uncertainties in Force Sensing for Robotic-Assisted Palpation / J. Guo, B. Xiao, H. Ren // Applied Sciences. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. - 2019. - №12.
59. Massari L. A Mechatronic Platform for Computer Aided Detection of Nodules in Anatomopathological Analyses via Stiffness and Ultrasound Measurements / L. Massari, A. Bulletti, S. Prasanna [и др.] // Sensors . - 2019. - №11.
60. Wanninayake I.B. Miniaturised optical fibre based palpations instrument for minimally invasive surgery / I.B. Wanninayake // Journal of Physics: Conference Series. - 2019. - №1151.
61. Reuben A. Examination of the abdomen / A. Reuben // Clinical Liver Disease. - 2016. - №6. - С. 143–150.

62. McGee S.R. Evidence-based Physical Diagnosis / S.R. McGee. - 3-е изд. - Philadelphia, PA: Elsevier Health Sciences, 2012. - 877 с.
63. Estes M.E.Z. Health assessment & physical examination / M.E.Z. Estes. - 3-е изд. - Clifton Park, NY: Thomson Delmar Learning, 2006. - 1152 с.
64. Ferguson C.M. Inspection, Auscultation, Palpation, and Percussion of the Abdomen / C.M. Ferguson // Clinical Methods: The History, Physical, and Laboratory Examinations / Под ред. Н.К. Walker, W.D. Hall, J.W. Hurst. - 3-е изд. - Boston: Butterworths, 1990.- 1087 с.
65. Манджони С. Секреты клинической диагностики / С. Манджони; пер. с англ. под. ред. А.В. Струтынского. - М.: БИНОМ, 2004. - 608 с.
66. Rusu R.B. Semantic 3D Object Maps for Everyday Manipulation in Human Living Environments / R.B. Rusu // Künstl Intell. - 2010. - №4. - С. 345–348.
67. Mehlhorn K. Algorithms and Data Structures: The Basic Toolbox / К. Mehlhorn, P. Sanders. - Berlin: Springer-Verlag, 2008. - 295 с.
68. Moore A.W. Efficient Memory-based Learning for Robot Control: дис. д-р. фил. - Cambridge, 1990. - 248 с.
69. Process Improvement using Data: сайт / К. Dunn. - URL: <https://learnche.org/pid/PID.pdf> (дата обращения: 05.06.2020).
70. Kmiecik B. Structure and Mechanical Properties of Soft Tissues during Selected Pathological Processes / B. Kmiecik, A. Skotny, J. Detyna // General Medicine: Open Access. - 2017. - №5. - С. 1–5.
71. McKee C.T. Indentation Versus Tensile Measurements of Young's Modulus for Soft Biological Tissues / C.T. McKee, J.A. Last, P. Russell [и др.] // Tissue Engineering. Part B, Reviews. - 2011. - №3. - С. 155-164.
72. Pilkey W.D. Formulas for stress, strain, and structural matrices / W.D. Pilkey. - Wiley, 2005. - 1548 с.
73. Hennesperger C. Towards MRI-Based Autonomous Robotic US Acquisitions: A First Feasibility Study / C. Hennesperger, B. Fuerst, S. Virga [и др.] // IEEE Transactions on Medical Imaging. - 2017. - №2. - С. 538-548.

74. MoveIt Motion Planning Framework: сайт / I. A. Sucas, S. Chitta. - URL: <https://moveit.ros.org/> (дата обращения: 05.06.2020).
75. Quigley M. ROS: an open-source Robot Operating System / M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey [и др.] // ICRA workshop on open source software. - 2009. - №3.
76. LBR iiwa: сайт / KUKA AG. - URL: <https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/industrial-robots/lbr-iiwa> (дата обращения: 05.06.2020).
77. Determining the elastic modulus of biological samples using atomic force microscopy: сайт / JPK BioAFM. - URL: <https://www.jpk.com/app-technotes-img/AFM/pdf/jpk-app-elastic-modulus.14-1.pdf> (дата обращения: 05.06.2020).
78. Logan D.L. A First Course in the Finite Element Method / D.L. Logan. - Cengage Learning, 2011. - 998 с.
79. Le J. DART: Dynamic Animation and Robotics Toolkit / J. Le, M.X. Grey, S. Ha [и др.] // Journal of Open Source Software. - 2018. - №22.
80. Jain S. Controlling physics-based characters using soft contacts / S. Jain, C.K. Liu // ACM Transactions on Graphics. - 2011. - №6. - С. 1–10.
81. SDFORMAT Specification URL: <http://sdformat.org/спец> (дата обращения: 05.06.2020).
82. Tonutti M. The role of technology in minimally invasive surgery: state of the art, recent developments and future directions / M. Tonutti, D.S. Elson, G.Z. Yang [и др.] // Postgraduate Medical Journal. - 2017. - №1097. - С. 159-167.
83. Shafikov A. Robotic Palpation Modeling for KUKA LBR IIWA Using Gazebo Simulator / A. Shafikov, A. Sagitov, H. Li, N. Schiefermeier-Mach, E. Magid // The 2020 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2020). - 2020. - С. 436-439.