

**Приложение к отчету о выполнении проекта № 16-19-00044**  
**«Принципы распределения задач между сервисными роботами и средствами**  
**киберфизического интеллектуального пространства при многомодальном**  
**обслуживании пользователей» в 2019 году**

Основной круг задач продолжающегося исследования направлен на разработку динамической системы восприятия окружения, способной анализировать объекты, находящиеся в интеллектуальном пространстве как при помощи стационарных средств киберфизического интеллектуального пространства, так и при помощи сервисных роботов, интегрированных в него. На основе разрабатываемых решений планируется сформировать подход к осуществлению захвата и дальнейшей манипуляции объектами посредством робототехнических средств для предоставления пользователям возможности удаленного взаимодействия с окружающей средой. В данном контексте актуальной является разработка тактильной системы сервисного робота и специализированных алгоритмов анализа поверхностей, которые позволят робототехническим средствам не только избегать препятствий на пути и сохранять равновесие на неровных поверхностях, но и расширят возможности киберфизических интеллектуальных пространств по манипулированию объектами. Для решения задачи анализа поверхностей и различных объектов окружающей среды посредством робототехнических средств, интегрированных в киберфизическую среду, необходимо разработать средства очувствления, расширяющие возможности таких систем по анализу окружающего пространства. Одним из наиболее перспективных решений представляется интеграция в робототехнические средства датчиков давления и приближения с целью анализа поверхностей объектов окружающей среды, а также различных камер и иных сенсорных устройств, способных обеспечить определение геометрических характеристик и положения объектов в пространстве. Поскольку в ходе выполнения основного проекта был разработан и успешно апробирован в киберфизическом пространстве МИНОС антропоморфный шагающий робот Антарес, основной фокус продолжающихся исследований направлен на разработку средств очувствления именно шагающих сервисных роботов.

Рассмотрим существующие сенсорные системы робототехнических средств, обеспечивающие анализ сложных поверхностей. В общем случае, динамическое отслеживание изменения расстояния до объекта может быть реализовано при помощи ультразвуковых или лазерных дальномеров, локаторов Доплера, а также посредством емкостных датчиков приближения. Однако для применения в конечностях робототехнических средств, а в особенности в их стопах, где требуется измерять достаточно малые расстояния, наиболее подходящим вариантом являются датчики, основанные на емкостном принципе, по причине того, что данные классы сенсорных устройств являются наиболее компактными и из них могут быть сформированы достаточно компактные матричные структуры с малым размером единичной ячейки. Наиболее распространенными классами датчиков, осуществляющими измерение приложенной силы / давления, являются силомоментные датчики, датчики нагрузки и тензометры, основанные на использовании тензорезистивного и емкостного принципов работы.

В процессе анализа методов и подходов внедрения сенсорных устройств в конечности шагающих роботов было установлено, что наиболее распространенным подходом к внедрению сенсоров в стопу робота является использование силомоментных датчиков, расположенных между опорной частью стопы и частью конструкции, связанной с голенью для определения и отслеживания точки нулевого момента (ТНМ) и центра масс робота. Такой метод находит широкое применение в полномасштабных шагающих роботах, что можно объяснить высокими требованиями к механической прочности датчика, а также относительно высокими значениями измеряемых величин сил и моментов. Применение такой компоновки обеспечивает возможность измерения сил и моментов, в первую очередь, для решения задачи сохранения равновесия робота при ходьбе [1-5]. Установка датчиков

силы непосредственно на контактирующую с опорной поверхностью плоскость стопы, представляющих из себя слой, изменяющий свои характеристики в зависимости от величины приложенной механической нагрузки, помимо решения задачи сохранения равновесия робота при ходьбе, позволяет получить информацию о распределении сил в пределах площади опоры стоп робота, а также информацию о свойствах опорной поверхности [6-8]. Подобные решения на основе первичных преобразователей давления, как правило, обладают малыми значениями массы и толщины, являются легко масштабируемыми и могут эффективно применяться в шагающих роботах средних и малых размеров. В тоже время, стоит отметить, что применение такого типа сенсоров имеет недостаток, обусловленный их меньшей механической прочностью. Однако, при использовании подхода, предполагающего, что сила, действующая на стопу, передается на сенсоры через элементы конструкции, поглощающие ударные механические нагрузки, данный недостаток датчиков нагрузки может быть скомпенсирован. Для получения существенной информации в отношении свойств поверхности, по которой осуществляется перемещение робототехнического средства, согласно результатам проведенных исследований, недостаточно использовать лишь силомоментные датчики или датчики нагрузки, требуется использовать более сложные сенсорные структуры, основанные на комбинировании различного рода сенсорных устройств.

В рамках проекта был осуществлен обзор методов и подходов комбинирования тензорезистивных и емкостных сенсорных устройств с целью анализа возможности совместного применения датчиков давления и приближения для улучшения результатов анализа поверхностей объектов. Наиболее перспективные из рассмотренных решений представляют собой гибридные прототипы, состоящие из тензорезистивных и емкостных сенсорных устройств [9-12]. Гибкость некоторых прототипов и матричная структура датчиков, позволяет размещать их на неровной поверхности. В основном, рассмотренные прототипы датчиков способны обнаруживать объект на небольших расстояниях (до 8,7 см), однако некоторые технологии (искусственная кожа) способны обнаружить объект на расстоянии до 20 см. Согласно результатам проведенного анализа, комбинирование датчиков давления и приближения осуществляется расположением датчиков либо рядом друг с другом в виде матрицы с ячейками из датчиков разного типа, либо один тип сенсоров расположен над другим, таким образом, что комбинируются различные матрицы или отдельные ячейки. Недостатком первого метода является снижение совокупной разрешающей способности матрицы. Расположение одного типа датчиков над другими лишено данного недостатка, но при этом ведет к снижению чувствительности и увеличению погрешности датчиков нижнего слоя. Тем не менее, комбинированное использование тензорезистивных и емкостных устройств позволяет успешно осуществлять регистрацию приложенного давления, измерение деформации поверхности объекта и расстояние до объекта. Исходя из проведенного анализа можно сделать вывод, что преимущественным способом комбинирования тензорезистивных и емкостных устройств является способ размещения одного типа датчиков над другим, в виде отдельных ячеек либо в виде матриц различных форм, например квадратной [13] или треугольной [14], что позволяет лучше заполнять матрицей датчиков площадь контактных поверхностей (стопа, схват) робота.

Рассмотрены типовые решения интерфейсных схем для тензорезистивных и емкостных сенсоров. Для датчиков емкостного типа предлагаемые решения основаны на использовании операционных усилителей с двухполярным питанием. Для тензорезистивных датчиков одними из распространенных схемотехнических решений являются мостовые усилители, например, схема усилителя с плавающим мостом и плавающим источником эталонного напряжения. Описанные в работе типовые интерфейсные схемы не предполагают обработки сигналов с комбинированных датчиков давления и приближения. В рассмотренных исследованиях [15-17], посвященных комбинированию датчиков давления и приближения, не приводится типовых схемотехнических решений, а соответственно при разработке собственного

комбинированного сенсорного устройства требуется также и разработка собственных схемотехнических решений. Для разработки системы очувствления конечностей шагающего робота необходимы данные об окружающей среде, такие как данные о соприкосновении конечностей с поверхностями различных типов и данные о силе давления конечности на поверхность, с которой происходит соприкосновение. Соответствующие данные возможно получить с датчиков, которые должны быть скомпонованы друг с другом таким образом, чтобы исключить влияние одних датчиков на показания, получаемые с других сенсорных устройств, а кроме того, должны обеспечивать предоставление наиболее полной и достоверной информации о взаимодействии конечностей шагающего робота с окружающей средой и объектами в ней.

Отметим, что сенсорное устройство для применения в конечностях шагающего сервисного робота должно соответствовать некоторым параметрам чувствительности, рабочего диапазона и иметь стабильные характеристики. Кроме того, разрабатываемое решение должно иметь достаточную защищенность от пыли и влаги, а также предусматривать возможность создания матричных сенсорных структур на его основе. Для установки датчика на опорную поверхность стопы шагающего робота необходимо, чтобы соответствующее устройство обладало минимально возможной толщиной, поскольку увеличение данного параметра негативным образом сказывается на характеристиках механического движения шагающих роботов: приводит к снижению устойчивости за счет смещения центра тяжести системы; увеличивает совокупный вес конструкции; приводит к необходимости внесения дополнительных корректировок в кинематические уравнения, связанные с управлением движением робототехнического средства. На сегодняшний день, среди существующих датчиков давления для установки на опорную поверхность стопы шагающих роботов чаще всего применяют тензорезистивные пленочные датчики, однако, данный класс устройств характеризуется нелинейной зависимостью между сопротивлением и приложенным давлением, а также имеет относительно высокое значение погрешности измерений и дрейфа показаний. Величина соответствующих параметров как правило ниже у датчиков, работающих на емкостном принципе, при этом определенные конструкции первичных емкостных преобразователей давления обладают малой толщиной. Кроме того, на основе проведенного анализа и собственных исследований, было установлено, что сенсорные устройства емкостного типа имеют большую стабильность выходного сигнала по сравнению с тензорезистивными датчиками слоистых структур. В связи с этим перспективной является разработка датчика давления, основанного на емкостном принципе, что, позволит повысить точность и достоверность соответствующих измерений. Кроме того, поскольку комбинирование устройств с разными принципами работы является более затруднительным, а их совместное использование неизбежно приводит к снижению стабильности и точности показаний обоих устройств, то комбинирование разрабатываемых емкостных датчиков давления с емкостными датчиками приближения в единую матричную структуру, представленную датчиками двух типов, позволит реализовать комбинированное сенсорное устройство для анализа давления и приближения, характеризующееся большей простотой с точки зрения схемотехнического решения, а также повышенной стабильностью характеристик, в сравнении с решениями, использующими резистивные датчики давления и емкостные датчики приближения при формировании комбинированных матричных структур.

На основе результатов проведенных анализов в рамках проекта было принято решение разработать собственный датчик давления на основе емкостного принципа работы. Для реализации считывания показаний с первичного емкостного преобразователя давления была разработана электрическая схема, показанная на рисунке 1. Генератор высокочастотных (ВЧ) импульсов питается от стабилизированного источника питания с выходным напряжением 5 В. Генератор высокочастотных импульсов прямоугольной формы выполнен на микросхеме TLC555IDR, частотоподающими цепями R1C1 и R3C2

задана рабочая частота  $F = 280$  кГц. К выходу микросхемы генератора подключен первичный преобразователь давления  $C(D)$  (ППД).

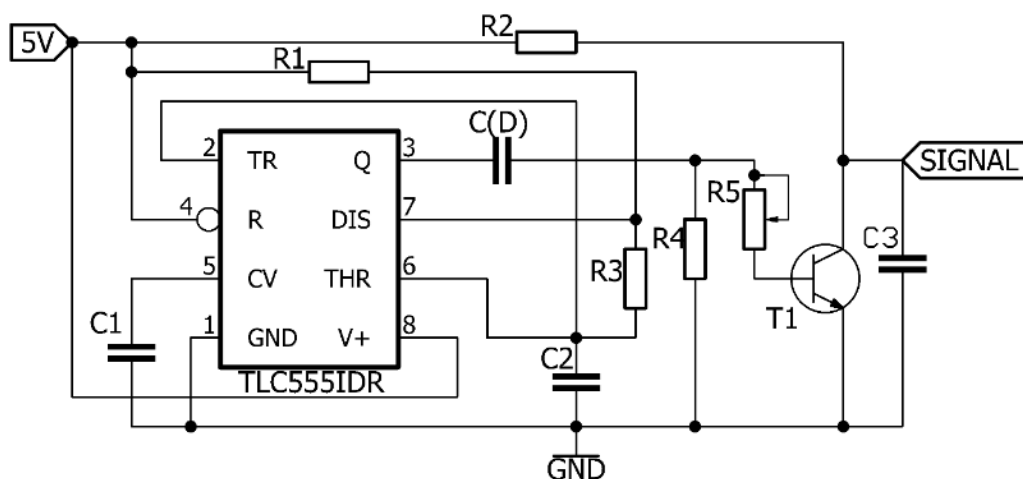


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема емкостного датчика давления

При изменении давления, оказываемого на ППД, изменяется его емкость и, соответственно, реактивное сопротивление. Ток, протекающий в цепи база-эмиттер биполярного n-p-n транзистора T1, зависит от величины реактивного сопротивления ППД и значения резисторов R4 и R5. Значения сопротивлений R4 и R5 являются расчетными и зависят от следующих параметров ППД: диэлектрической проницаемостью зазора ППД –  $\epsilon$ ; площадью электродов – S; минимальным расстоянием между электродами –  $d_{\min}$ , соответствующему максимальному давлению на первичный преобразователь.

Одним из преимуществ разработанного схемотехнического решения является линейная выходная характеристика датчика. Данный факт обусловлен тем, что для получения данных о давлении с емкостного ППД, используется не прямое измерение изменяющегося параметра - емкости, а косвенное измерение реактивного сопротивления, которое изменяется линейно от расстояния между электродами ППД. Линейное изменение расстояния между электродами ППД в свою очередь обусловлено упругой деформацией материала, расположенного по периметру электродов, в качестве которого применен силикон. Структурная схема ППД изображена на рисунке 2.

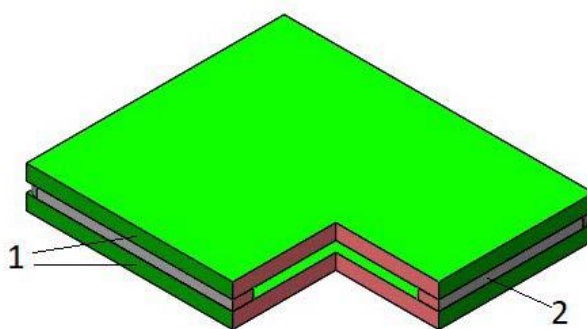


Рисунок 2 – Структурная схема ППД

ППД выполнен в виде трехслойной структуры с габаритными размерами  $30 \times 25 \times 3,73$  мм. Верхний и нижний слои состоят из пластин фольгированного стеклотекстолита (1) и являются электродами  $C(D)$  емкостного ППД. Центральный слой (2) представляет собой силиконовую полосу шириной 2 мм и толщиной 0,5 мм, проходящую по периметру электродов, и фиксирующуюся на электродах с помощью двухсторонней клейкой ленты. Результирующим сигналом датчика является значение постоянного напряжения, снимаемое с коллектора T1, для сглаживания пульсаций которого используется конденсатор C3.

Разработка нового измерительного устройства предполагает предварительное определение области и условий его функционирования, в соответствии с которыми определяются результирующие требования к разрабатываемому устройству в том числе в контексте необходимой точности измерений. После разработки образцов измерительного устройства требуется осуществить проверку соответствия фактических характеристик устройства заявленным требованиям.

Основными характеристиками датчиков согласно [18] являются: чувствительность – отношение изменения выходного сигнала к соответствующему измерению задающего воздействия; линейность – способность средства измерения обеспечивать пропорциональность показаний выходного сигнала приложенному воздействию; стабильность – способность датчика поддерживать разность между выходным сигналом при максимальной нагрузке и выходным сигналом при минимальной нагрузке в указанных пределах за весь период применения; срок службы – период времени использования датчика, в котором он соответствует своим качественным характеристикам; повторяемость – способность датчика выдавать последовательные согласованные результаты при той же нагрузке, приложенной к датчику одним и тем же способом; диапазон измерений – диапазон значений измеряемой величины, в котором погрешность измерений не превышает пределов допустимой погрешности; время отклика – минимальное время между приложением нагрузки к датчику и получением выходного сигнала с датчика соответствующего приложенной нагрузке; гистерезис – разность между показаниями на выходе датчика при одной и той же приложенной нагрузке, причем одно показание получено при увеличении нагрузки от минимальной, а другое при уменьшении от максимальной; дрейф – изменение выходного сигнала датчика, происходящее со временем, тогда как нагрузка, условия окружающей среды и другие изменяемые показатели остаются постоянными; погрешность – разность между результатом измерения датчика и истинным значением измеряемой величины.

Для датчиков давления, применяемых в конечностях шагающих роботов, наиболее важными характеристиками являются чувствительность, линейность и дрейф. Выходной сигнал датчика, обладающего малой чувствительностью, не изменится при малом изменении приложенного давления. Использование датчиков с малой чувствительностью в составе матрицы, установленной в стопе шагающего робота, приведет к ошибке в расчете ТНМ и ошибке анализа поверхности, по которой движется робот. Линейность выходных значений датчика позволяет установить однозначное соответствие между показаниями датчика и приложенной к датчику нагрузке, что позволяет упростить алгоритмы расчета ТНМ и центра приложения давления, а, следовательно, снизить вычислительную нагрузку на процессорное устройство, обрабатывающее показания датчика. Дрейф показаний датчика приводит к несоответствию выходных значений и приложенных нагрузок с течением времени или количеством циклов нагружения. В связи с особенностью передвижения шагающего робота, датчики, установленные в стопе робота, постоянно испытывают циклические нагрузки. При большом значении дрейфа в относительно короткий промежуток времени возникает сильное несоответствие между показаниями датчика и реальным значением приложенных к датчику нагрузок, следствием чего являются неизбежные ошибки в расчетах, основывающихся на показаниях такого устройства. Для определения каждой конкретной характеристики устройства проводится свой тип испытаний с необходимостью учёта влияния окружающей среды и средств испытаний на получаемые результаты.

В целях тестирования характеристик разработанного решения с использованием специализированного испытательного стенда была получена зависимость величины выходного сигнала датчика от приложенной к датчику силы, данная характеристическая кривая представлена на рисунке 3.

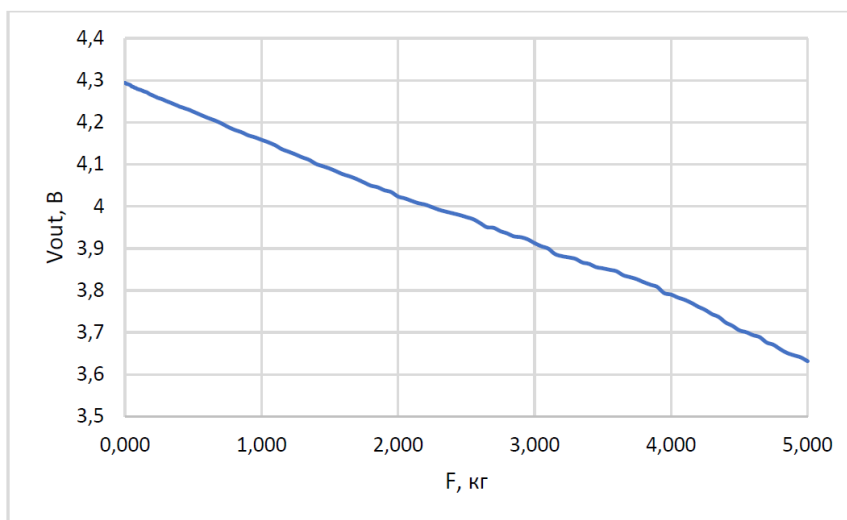


Рисунок 3 – Зависимость выходного сигнала датчика от приложенного к датчику давления

Зависимость, представленная на рисунке 3, имеет линейный характер с незначительными флуктуациями. Согласно характеристике, представленной на рисунке 3, расчётная чувствительность датчика составляет 0,122 В/кг.

Для определения циклического дрейфа показаний датчик поочередно нагружался силами 1,035 и 2,670 кг с интервалом 10 секунд. Полученная характеристика представлена на рисунке 4.

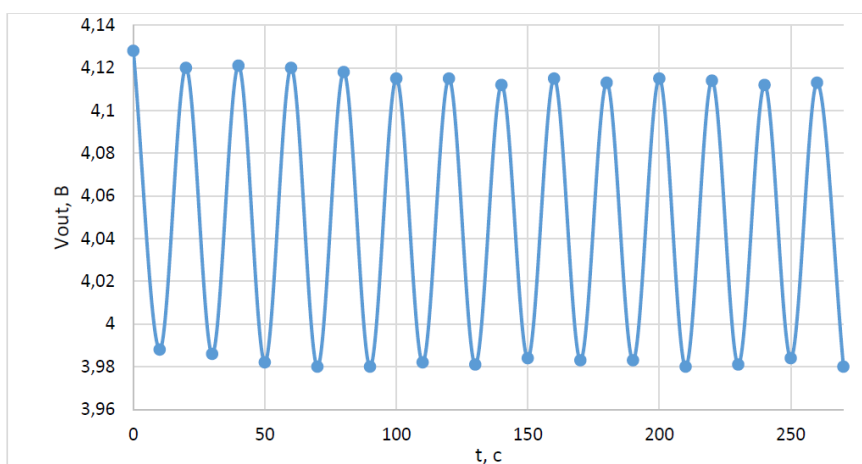


Рисунок 4 – Характеристика циклического дрейфа показаний датчика

Представленная на рисунке 4 кривая являются убывающей на всем интервале полученных значений. Расчетное значение циклического дрейфа составило 0,29 % и 0,08 % для сил 1,035 и 2,670 кг соответственно.

Таким образом, разработанный емкостной датчик давления измеряет силу в диапазоне, позволяющем использовать его в стопе шагающих роботов малых и средних размеров, и разработать на его основе матрицу сенсоров для анализа поверхностей и вычисления ТНМ. Разработанный емкостный ППД прост в изготовлении и не требует применения специальных технологий, и материалов, в отличие от тензорезистивных датчиков. Прототип датчика с деформируемым элементом из силикона имеет чувствительность к приложенному давлению 0,122 В/кг и диапазон работы до 5 кг в котором показания датчика имеют линейный характер. Чувствительность и диапазон работы датчика могут быть изменены в случае применения другого материала в качестве деформируемого элемента.

Разработанное схемотехническое решение позволяет ставить приложенное к датчику давление в линейное соответствие выходному сигналу, что является важным параметром при эксплуатации сенсорного устройства в опорной конечности робота. Это

позволит снизить затраты вычислительных ресурсов на обработку показаний, получаемых с датчика. Полученные значения циклического дрейфа (0,29 %) значительно ниже, чем у пленочных тензорезистивных датчиков (3-5%) которые чаще всего устанавливают в стопы шагающих роботов.

Кроме того, в рамках гранта была разработана методика расчета чувствительности мембранных емкостных сенсоров на основе электретов. Разработанная методика позволяет вычислять статические, динамические и электрические характеристики системы. Предлагаемая методика позволяет сравнительно просто и достаточно точно производить расчёт прогибов мембран под действием электростатических сил, оценивать чувствительность электретных емкостных сенсоров мембранного типа, нагруженных на RC-нагрузку и анализировать влияние различных параметров емкостных сенсоров на их характеристики. По предложенной методике проведен расчет характеристик электретного микрофона с заданными параметрами, показавший высокую сходимость с экспериментально полученными характеристиками. Дальнейшие исследования в этой области будут продолжены в направлении разработки матрицы, состоящей из электретных емкостных сенсоров, для последующей установки в робототехнические средства.

На основе предложенных решений планируется разработать подход к осуществлению захвата и дальнейшей манипуляции объектами посредством робототехнических средств. Предполагается, что данный подход будет обеспечивать формирование виртуальных трехмерных представлений объектов окружающей среды, на основе которых будут определяться ключевые точки для захвата соответствующих объектов. Также данный подход будет включать в себя построение маршрута движения робототехнических средств до найденных ключевых точек и перемещение захватного средства к целевому объекту в киберфизическом интеллектуальном пространстве. В процесс захвата объекта предполагается интегрировать алгоритмы анализа захватываемой поверхности на основе данных различных сенсоров, функционирующие в режиме реального времени.

Формирование трехмерного представления объектов планируется реализовать с использованием разработанного метода, предполагающего последовательную реализацию следующих шагов: получение изображения сцены, сегментация области объекта, получение карты глубины, построение трехмерного представления. Первый этап обеспечивает формирование исходных данных для построения трёхмерной модели. Это могут быть данные, полученные с видео- или фотокамеры. На втором этапе происходит сегментация объекта, сегментация в данном случае используется для фильтрации основного объекта от окружающей среды для построения более точной карты глубины. Затем осуществляется непосредственное построение карты глубины для выделенного в результате сегментации участка сцены, а на заключительном шаге построенная карта глубины преобразуется в трехмерное представление целевого объекта.

В процессе выполнения работ над проектом были проанализированы следующие решения для сегментации объектов: FCN, DeepLab, SegNet, DeconvNet, PSPNet-MSF, ResNet38, ENet, SQ, DUC, RefineNet, FRRN, DeepLabv2, Dilation10, DPN, CRF-RNN, Mask RCNN. Среди них была выделена нейронная сеть Mask R-CNN, которая обладает следующими преимуществами: возможность быстрого дообучения и более высокая скорость работы по сравнению с аналогами.

Карта глубины содержит информацию о местоположении объектов рассматриваемой сцены и может быть использована для получения информации о форме этих объектов. Традиционным способом получения карт глубины является использование стереокамеры. В настоящее время прикладные методы построения карт глубины на основе стереоизображений активно разрабатываются на основе технологий, ранее опробованных на платформе Microsoft Kinect [19]. Кроме того, подобные задачи могут решаться, например, с применением метода зеркального разделения изображений [20]. Несмотря на преимущества данного подхода, для его реализации требуется специфическое аппаратное

и программное обеспечение, что существенно сужает область его применения. Также, карта глубины может быть получена с помощью датчиков глубины (LIDAR, RGB-D камера), которые позволяют получить высокоточные модели облаков точек, однако стоит отметить, что данная аппаратура имеет относительно высокую стоимость в сравнении с обычными видео- и фотокамерами. Стоит отметить, что на сегодняшний день также существует множество подходов к извлечению карт глубины из одного двумерного изображения с использованием глубокой свёрточной нейронной сети (CNN). Проведенный анализ, связанный с данной темой, показал, что наименьшая величина среднеквадратического отклонения (СКО) была достигнута в работе [21] (СКО 0,555) и [22] (СКО 0,573). Разработанная авторами модель, таким образом, продемонстрировала наиболее высокую точность предсказания выходной карты глубины. Однако, в рамках данного проекта для решения задачи построения карты глубины в качестве типовой архитектуры была выбрана архитектура, представленная в работе [22] с заявленным значением СКО 0,573, поскольку она обладает меньшим количеством параметров обучения, а значит, требует меньшего количества данных для обучения, чем аналогичные методы. Архитектура данной сети построена на основе остаточной нейронной сети ResNet-50 [23] и дополняет последнюю новыми блоками, которые содержат меньшее количество весов, при этом повышая точность предсказания карт глубины. В работе был проведен эксперимент, в котором сравнивалась работа данной сети с другими моделями: AlexNet, VGG и ResNet-50. Сети тестировались на обучающих наборах данных NYU Depth и Make3D. Результаты сравнения моделей показали, что предлагаемая архитектура значительно превосходит аналогичные решения в задаче построения карты глубины на основе одного RGB изображения. Кроме того, в работе предлагается сопряжение данной архитектуры со SLAM-алгоритмом, при котором отслеживание от кадра к кадру достигается с помощью оптимизации Гаусса-Ньютона [24], что может способствовать решению задачи нахождения абсолютного масштаба построенной карты глубины.

Заключительным шагом разработанного метода является преобразование построенной карты глубины в трехмерное представление объекта. Трёхмерное представление объекта может быть представлено в виде облака точек, полигонов или вокселей. Облако точек – это широко используемая трёхмерная форма данных, которая применима, в основном, к задачам классификации трёхмерных объектов, семантической сегментации и обнаружения трёхмерных объектов. Проведенный анализ работ, связанных с данной темой, показал, что среди существующих моделей, которые были обучены на наборе данных ModelNet10, наибольшей точностью сопоставления объектов на трёхмерной сцене с метками класса обладают модели SO-Net (95,5%) и Kd-Net(93,5%), а среди обученных на наборе данных ModelNet40 наивысшие результаты в задаче классификации трёхмерных объектов показали модели глубокой нейронной сети PointCNN(91,7%) и SO-Net(90,8%). Максимальной производительности в задаче семантической сегментации трёхмерного облака точек достигают модели глубокой нейронной сети PointNet++ [25] и Dynamic Graph CNN [26], а с задачей обнаружения трёхмерных объектов среди существующих моделей наилучшим образом справляется модель нейронной сети PointRCNN [27]. Метод представления трёхмерного пространства в виде полигонов, представленный в работах [28, 29], представляет собой построение трёхмерной модели пространства по найденным координатам точек при помощи метода триангуляции. К недостаткам данного подхода можно отнести большую вычислительную сложность алгоритмов, а также сложность наложения текстуры на выходную трёхмерную модель. Другой подход основан на представлении трёхмерного пространства в виде дискретной сетки, элемент которой по аналогии с пикселем называется «воксел». Данный подход представлен в работах: [30-33]. В процессе анализа соответствующих исследований был сделан вывод о наибольшей эффективности воксельного подхода, поскольку он не тратит ресурсов или пропускной способности на плохосжимаемые компоненты векторов или векторных представлений данных, таких как полигоны и облака точек. Также воксели



абсолютно пригодны для построения трехмерных объектов для их дальнейшего анализа и поиска ключевых точек захвата. В связи с простотой хранения и представления воксельных данных в дальнейшем, они будут использоваться для построения системы, которая посредством предварительного сканирования объектов окружающей среды с помощью робототехнических средств будет реализовывать сервис предоставления пользователям информации о свойствах таких объектов исходя из характеристик их трехмерных представлений.

Проведенный анализ работ, связанный с вопросами захвата объектов посредством робототехнических средств, показал, что наибольшей точности определения точек захвата объектов достигает модель нейронной сети 6-DOF GraspNet, представленная в [34]. Данные о трехмерных объектах в работе представлены в виде вокселей. В работе были проведены эксперименты, в которых авторы применили данный подход на коллаборативном роботе Franka Panda со встроенной RGB-D камерой. Результаты экспериментов показали, что точность определения точек захвата в среднем составила 88%; наибольшую точность модель показывает при захватывании широких чашек – 100%; наименьшую точность данная модель показывает при захватывании кружек – 86%. В ходе проведенного анализа было также выявлено, что основными проблемами большинства существующих решений задачи определения точек захвата объектов являются: небольшой максимально допустимый вес объектов для захвата [35], неудовлетворительное качество работы решений на объектах маленького размера и сложной геометрической формы [36], кроме того, в большинстве исследований, посвященных данной проблеме, не осуществлялось тестирование разработанных моделей на реальных объектах с захватом роботизированной системой [37]. В рамках проекта для дальнейшего использования была выбрана модель нейронной сети, предложенная в работе [34], поскольку она способна верно определять точки захвата для предметов, имеющих более сложную форму (широкие чашки и кружки) и относительно больший размер (коробки), чем существующие аналоги.

Для построения траектории движения захватного устройства к целевому объекту могут быть использованы распространённые алгоритмы управления, представленные в библиотеке MoveIt [38], большинство из которых достаточно хорошо справляется с решением этой задачи. По результатам подробного анализа специфики и особенностей применения данных алгоритмов, в рамках проекта было принято решения воспользоваться планировщиком путей RRT-Connect [39].

Проведенный обзор методов машинного обучения для анализа поверхностей позволяет разработать подход к осуществлению захвата и дальнейшей манипуляции объектами посредством робототехнических средств. В дальнейшем на основе данного подхода может быть разработан сервис мониторинга и управления положением объектов окружающей среды в киберфизическом интеллектуальном пространстве.

**Все планируемые на год работы выполнены полностью:**

да

**Сведения о достигнутых конкретных научных результатах в отчетном году**

В процессе выполнения проекта в 2019 году были достигнуты следующие результаты. Был проведен расширенный аналитический обзор методов реализации в шагающих роботах сенсорных систем, обеспечивающих анализ поверхностей. Наиболее перспективными решениями в данном случае представляется интеграция в робототехнические средства датчиков давления и приближения с целью анализа свойств поверхностей объектов окружающей среды, а также различных камер и иных сенсорных устройств, способных обеспечить определение геометрических характеристик и положения таких объектов в пространстве. Приближение объекта в общем случае может быть изменено ультразвуковым или лазерным дальномером, локатором Доплера, а также емкостным

датчиком приближения. Для применения в конечностях роботов, а в особенности в стопах шагающих роботов, где требуется измерять достаточно малые расстояния, наиболее подходящим вариантом являются датчики, основанные на емкостном принципе, по причине того, что данные классы сенсорных устройств являются наиболее компактными и из них могут быть сформированы достаточно компактные матричные структуры с малым размером единичной ячейки. Наиболее распространенными классами датчиков, осуществляющих измерение приложенной силы / давления, являются силомоментные датчики, датчики нагрузки и тензометры, основанные на использовании тензорезистивного и емкостного принципов работы.

Согласно результатам проведенных исследований для получения существенной информации в отношении свойств поверхности, с которой осуществляется взаимодействие со стороны робототехнического средства, недостаточно использовать лишь силомоментные датчики или датчики нагрузки, требуется использовать более сложные сенсорные структуры, основанные на комбинировании различного рода сенсорных устройств. В связи с этим в рамках проекта был осуществлен обзор методов и подходов к комбинированию тензорезистивных и емкостных сенсорных устройств с целью анализа возможности совместного применения датчиков давления и приближения для улучшения результатов анализа поверхностей объектов. Кроме того, был выполнен анализ актуальных исследований в контексте внедрения комбинированных сенсорных устройств в конечности шагающих роботов. По результатам проведенного анализа и собственных исследований были сформированы ключевые требования к сенсорным устройствам, внедряемым в конечности шагающих роботов: сенсорное устройство должно соответствовать некоторым параметрам чувствительности, рабочего диапазона и иметь стабильные характеристики, должно иметь достаточную защищенность от пыли и влаги. Необходимым условием также является возможность разработки на основе данного датчика матричных сенсорных структур. Поскольку собственные исследования осуществлялись на примере внедрения сенсоров в шагающего антропоморфного робота (Антарес), то для успешной установки сенсоров на опорную поверхность стопы данного класса робототехнических систем были выявлены дополнительные требования, в частности, необходимо, чтобы соответствующее устройство обладало минимально возможной толщиной, поскольку увеличение данного параметра у соответствующих сенсорных устройств негативным образом сказывается на характеристиках механического движения робота: приводит к снижению устойчивости, за счет смещения центра тяжести системы; увеличивает совокупный вес конструкции; приводит к необходимости внесения дополнительных корректировок в кинематические уравнения, связанные с управлением движением робототехнического средства.

По результатам проведенных исследований было установлено, что на сегодняшний день, среди существующих датчиков давления для установки в конечности шагающих роботов чаще всего применяют тензорезистивные пленочные датчики, однако, данный класс устройств характеризуется нелинейной зависимостью между сопротивлением и приложенным давлением, а также имеет относительно высокое значение погрешности измерений и дрейфа показаний. Величина соответствующих параметров как правило ниже у датчиков, работающих на емкостном принципе, при этом определенные конструкции первичных емкостных преобразователей давления обладают малой толщиной. В результате проведенных исследований также было установлено, что сенсорные устройства емкостного типа имеют большую стабильность выходного сигнала по сравнению с тензорезистивными датчиками слоистых структур. В связи с этим перспективной является разработка датчика давления, основанного на емкостном принципе, что, позволит повысить точность и достоверность соответствующих измерений. Кроме того, поскольку комбинирование устройств с разными принципами работы является более затруднительным, а их совместное использование неизбежно приводит к снижению стабильности и точности показаний обоих устройств, то комбинирование емкостных датчиков давления с емкостными датчиками приближения в единую матричную структуру, представленную датчиками двух типов,

позволит реализовать комбинированное сенсорное устройство для анализа давления и приближения, характеризующееся большей простотой с точки зрения схемотехнического решения, а также повышенной стабильностью характеристик, в сравнении с решениями, использующими резистивные датчики давления и емкостные датчики приближения при формировании комбинированных матричных структур.

Был проведен расширенный аналитический обзор методов машинного обучения для определения свойств и особенностей поверхностей. Поскольку в рамках проекта планируется сформировать подход к осуществлению робототехническим средством захвата и дальнейшей манипуляции объектами на основе разнородных данных киберфизического окружения, целью данного обзора являлось изучение методов, применимых для формирования виртуальных трехмерных представлений объектов. В частности, для этого могут быть использованы данные как стационарных камер киберфизического окружения, так и камер, установленных на робототехнических средствах, интегрированных в него. Таким образом, в процессе выполнения работ над проектом были проанализированы различные методы сегментации изображений и поиска объектов на изображениях. В результате проведенного анализа для дальнейшего использования была выбрана нейронная сеть Mask R-CNN, которая характеризуется возможностью быстрого дообучения и более высокой скоростью работы по сравнению с аналогами. Кроме того, в рамках проекта были исследованы различные методы построения карт глубины на основе стереоизображений, на основе одного двумерного изображения с использованием глубокой свёрточной нейронной сети (CNN), с использованием датчиков глубины (LIDAR, RGB-D камера). По итогам проведенного анализа было принято решение воспользоваться подходом на основе глубокой свёрточной нейронной сети. Для решения задачи построения карты глубины в качестве типовой архитектуры была выбрана архитектура, представленная в работе [22] с заявленным значением СКО 0,573, поскольку она обладает меньшим количеством параметров обучения, а значит, требует меньшего количества данных для обучения, чем аналогичные методы. Архитектура данной сети построена на основе остаточной нейронной сети ResNet-50 [23] и дополняет последнюю новыми блоками, которые содержат меньшее количество весов, при этом повышая точность предсказания карт глубины.

В рамках проекта был также рассмотрен вопрос преобразования построенной карты глубины в трехмерное представление объекта. В общем случае трёхмерное представление объекта может быть представлено в виде облака точек, полигонов или вокселей. В процессе анализа соответствующих исследований был сделан вывод о наибольшей эффективности воксельного подхода, поскольку он не тратит ресурсов или пропускной способности на плоскосжимаемые компоненты векторов или векторных представлений данных, таких как полигоны и облака точек. Также воксели абсолютно пригодны для построения трехмерных объектов для их дальнейшего анализа и поиска ключевых точек захвата. На основе проведенных исследований был разработан собственный метод сканирования объектов внешнего окружения, осуществляющий определение их геометрических характеристик и положения в пространстве. Разработанный метод предполагает последовательную реализацию следующих шагов: получение изображения сцены, сегментация области объекта, получение карты глубины, построение трехмерного представления объекта. Первый этап обеспечивает формирование исходных данных для построения трёхмерной модели, которые представляют собой данные, полученные с видео- или фотокамеры. На втором этапе проводится сегментация изображения, которая в данном случае используется для выделения основного объекта из окружающей среды для построения более точной карты глубины. Затем осуществляется непосредственное построение карты глубины для выделенного в результате сегментации участка сцены, а на заключительном шаге построенная карта глубины преобразуется в трехмерное представление целевого объекта.

В процессе выполнения проекта был также проведен анализ работ, посвященный обеспечению возможностей по захвату объектов робототехническим средством, который показал, что наибольшей точности определения точек захвата объектов достигает модель

нейронной сети 6-DOF GraspNet, представленная в [34]. Данная модель нейронной сети была выбрана для дальнейшего использования в рамках проекта, поскольку помимо наибольшей точности в определении точек захвата объектов, она также способна верно определять точки захвата для предметов, имеющих более сложную форму (широкие чашки и кружки) и относительно больший размер (коробки), чем существующие аналоги. Согласно результатам проведенного анализа для построения траектории движения робототехнического средства к целевому объекту могут быть использованы распространённые алгоритмы управления, представленные в библиотеке MoveIt [38], большинство из которых достаточно хорошо справляется с решением этой задачи. По результатам подробного анализа специфики и особенностей применения данных алгоритмов, в рамках проекта было принято решение воспользоваться планировщиком путей RRT-Connect [39].

В целях разработки подхода к осуществлению робототехническим средством захвата и перемещения объектов окружающей среды с учетом проведенного анализа методов реализации в шагающих роботах сенсорных систем, обеспечивающих анализ поверхностей был разработан собственный емкостной датчик давления для применения в шагающих роботах. Для реализации считывания показаний с первичного емкостного преобразователя давления было разработано схмотехническое решение. Одним из преимуществ разработанного схмотехнического решения является линейная выходная характеристика датчика. Данный факт обусловлен тем, что для получения данных о давлении с емкостного первичного преобразователя давления (ППД), используется не прямое измерение изменяющегося параметра (емкости), а косвенное измерение реактивного сопротивления, которое изменяется линейно в зависимости от расстояния между электродами ППД. Линейное изменение расстояния между электродами ППД в свою очередь обусловлено упругой деформацией материала, расположенного по периметру электродов (силикон). Разработанный емкостной датчик давления измеряет силу в диапазоне, позволяющем использовать его в стопе шагающих роботов малых и средних размеров, и разработать на его основе матрицу сенсоров для анализа поверхностей. Разработанный емкостной ППД прост в изготовлении и не требует применения специальных технологий и материалов, в отличие от тензорезистивных датчиков. Прототип датчика с деформируемым элементом из силикона с имеет чувствительность к приложенному давлению  $0,122 \text{ В/кг}$  и диапазон работы до  $5 \text{ кг}$ , в котором показания датчика носят линейный характер. Разработанное схмотехническое решение позволяет ставить приложенное к датчику давление в линейное соответствие выходному сигналу, что является важным параметром при эксплуатации сенсорного устройства в опорной конечности робота. Это позволит снизить затраты вычислительных ресурсов на обработку показаний, получаемых с датчика. Полученные значения циклического дрейфа ( $0,29 \%$ ) значительно ниже, чем у пленочных тензорезистивных датчиков ( $3-5\%$ ) которые чаще всего устанавливаются в стопы шагающих роботов.

Кроме того, была разработана методика расчета чувствительности мембранных емкостных сенсоров на основе электретов. Разработанная методика позволяет вычислять статические, динамические и электрические характеристики системы. Предлагаемая методика позволяет сравнительно просто и достаточно точно производить расчет прогибов мембран под действием электростатических сил, оценивать чувствительность электретных емкостных сенсоров мембранного типа, нагруженных на RC-нагрузку и анализировать влияние различных параметров емкостных сенсоров на их характеристики. По предложенной методике проведен расчет характеристик электретного микрофона с заданными параметрами, показавший высокую сходимость с экспериментально полученными характеристиками. Дальнейшие исследования в этой области будут продолжены в направлении разработки матрицы, состоящей из электретных емкостных сенсоров, для последующей установки в робототехнические системы.

## **Все запланированные в отчетном году научные результаты достигнуты:**

да

## **Описание выполненных в отчетном году работ и полученных научных результатов для публикации на сайте РФФИ**

### ***на русском языке***

В процессе выполнения проекта в 2019 году были достигнуты следующие результаты. Был проведен расширенный аналитический обзор методов реализации в шагающих роботах сенсорных систем, обеспечивающих анализ поверхностей. Наиболее перспективными решениями в данном случае представляется интеграция в робототехнические средства датчиков давления и приближения с целью анализа свойств поверхностей объектов окружающей среды, а также различных камер и иных сенсорных устройств, способных обеспечить определение геометрических характеристик и положения таких объектов в пространстве. Приближение объекта в общем случае может быть изменено ультразвуковым или лазерным дальномером, локатором Доплера, а также емкостным датчиком приближения. Для применения в конечностях роботов, а в особенности в стопах шагающих роботов, где требуется измерять достаточно малые расстояния, наиболее подходящим вариантом являются датчики, основанные на емкостном принципе, по причине того, что данные классы сенсорных устройств являются наиболее компактными и из них могут быть сформированы достаточно компактные матричные структуры с малым размером единичной ячейки. Наиболее распространенными классами датчиков, осуществляющих измерение приложенной силы / давления, являются силомоментные датчики, датчики нагрузки и тензометры, основанные на использовании тензорезистивного и емкостного принципов работы.

Согласно результатам проведенных исследований для получения существенной информации в отношении свойств поверхности, с которой осуществляется взаимодействие со стороны робототехнического средства, недостаточно использовать лишь силомоментные датчики или датчики нагрузки, требуется использовать более сложные сенсорные структуры, основанные на комбинировании различного рода сенсорных устройств. В связи с этим в рамках проекта был осуществлен обзор методов и подходов к комбинированию тензорезистивных и емкостных сенсорных устройств с целью анализа возможности совместного применения датчиков давления и приближения для улучшения результатов анализа поверхностей объектов. Кроме того, был выполнен анализ актуальных исследований в контексте внедрения комбинированных сенсорных устройств в конечности шагающих роботов. По результатам проведенного анализа и собственных исследований были сформированы ключевые требования к сенсорным устройствам, внедряемым в конечности шагающих роботов: сенсорное устройство должно соответствовать некоторым параметрам чувствительности, рабочего диапазона и иметь стабильные характеристики, должно иметь достаточную защищенность от пыли и влаги. Необходимым условием также является возможность разработки на основе данного датчика матричных сенсорных структур. Поскольку собственные исследования осуществлялись на примере внедрения сенсоров в шагающего антропоморфного робота (Антарес), то для успешной установки сенсоров на опорную поверхность стопы данного класса робототехнических систем были выявлены дополнительные требования, в частности, необходимо, чтобы соответствующее устройство обладало минимально возможной толщиной, поскольку увеличение данного параметра у соответствующих сенсорных устройств негативным образом сказывается на характеристиках механического движения робота: приводит к снижению устойчивости, за счет смещения центра тяжести системы; увеличивает совокупный вес конструкции; приводит к необходимости внесения дополнительных корректировок в кинематические уравнения, связанные с управлением движением робототехнического средства.

По результатам проведенных исследований было установлено, что на сегодняшний день, среди существующих датчиков давления для установки в конечности шагающих роботов чаще всего применяют тензорезистивные пленочные датчики, однако, данный класс устройств характеризуется нелинейной зависимостью между сопротивлением и приложенным давлением, а также имеет относительно высокое значение погрешности измерений и дрейфа показаний. Величина соответствующих параметров как правило ниже у датчиков, работающих на емкостном принципе, при этом определенные конструкции первичных емкостных преобразователей давления обладают малой толщиной. В результате проведенных исследований также было установлено, что сенсорные устройства емкостного типа имеют большую стабильность выходного сигнала по сравнению с тензорезистивными датчиками слоистых структур. В связи с этим перспективной является разработка датчика давления, основанного на емкостном принципе, что, позволит повысить точность и достоверность соответствующих измерений. Кроме того, поскольку комбинирование устройств с разными принципами работы является более затруднительным, а их совместное использование неизбежно приводит к снижению стабильности и точности показаний обоих устройств, то комбинирование емкостных датчиков давления с емкостными датчиками приближения в единую матричную структуру, представленную датчиками двух типов, позволит реализовать комбинированное сенсорное устройство для анализа давления и приближения, характеризующееся большей простотой с точки зрения схемотехнического решения, а также повышенной стабильностью характеристик, в сравнении с решениями, использующими резистивные датчики давления и емкостные датчики приближения при формировании комбинированных матричных структур.

Был проведен расширенный аналитический обзор методов машинного обучения для определения свойств и особенностей поверхностей. Поскольку в рамках проекта планируется сформировать подход к осуществлению робототехническим средством захвата и дальнейшей манипуляции объектами на основе разнородных данных киберфизического окружения, целью данного обзора являлось изучение методов, применимых для формирования виртуальных трехмерных представлений объектов. В частности, для этого могут быть использованы данные как стационарных камер киберфизического окружения, так и камер, установленных на робототехнических средствах, интегрированных в него. Таким образом, в процессе выполнения работ над проектом были проанализированы различные методы сегментации изображений и поиска объектов на изображениях. В результате проведенного анализа для дальнейшего использования была выбрана нейронная сеть Mask R-CNN, которая характеризуется возможностью быстрого дообучения и более высокой скоростью работы по сравнению с аналогами. Кроме того, в рамках проекта были исследованы различные методы построения карт глубины на основе стереоизображений, на основе одного двумерного изображения с использованием глубокой свёрточной нейронной сети (CNN), с использованием датчиков глубины (LIDAR, RGB-D камера). По итогам проведенного анализа было принято решение воспользоваться подходом на основе глубокой свёрточной нейронной сети. Для решения задачи построения карты глубины в качестве типовой архитектуры была выбрана архитектура с заявленным значением СКО 0,573, поскольку она обладает меньшим количеством параметров обучения, а значит, требует меньшего количества данных для обучения, чем аналогичные методы. Архитектура данной сети построена на основе остаточной нейронной сети ResNet-50 и дополняет последнюю новыми блоками, которые содержат меньшее количество весов, при этом повышая точность предсказания карт глубины.

В рамках проекта был также рассмотрен вопрос преобразования построенной карты глубины в трехмерное представление объекта. В общем случае трёхмерное представление объекта может быть представлено в виде облака точек, полигонов или вокселей. В процессе анализа соответствующих исследований был сделан вывод о наибольшей эффективности воксельного подхода, поскольку он не тратит ресурсов или пропускной способности на плоскосжимаемые компоненты векторов или векторных представлений данных, таких как

полигоны и облака точек. Также воксели абсолютно пригодны для построения трехмерных объектов для их дальнейшего анализа и поиска ключевых точек захвата. На основе проведенных исследований был разработан собственный метод сканирования объектов внешнего окружения, осуществляющий определение их геометрических характеристик и положения в пространстве. Разработанный метод предполагает последовательную реализацию следующих шагов: получение изображения сцены, сегментация области объекта, получение карты глубины, построение трехмерного представления объекта. Первый этап обеспечивает формирование исходных данных для построения трёхмерной модели, которые представляют собой данные, полученные с видео- или фотокамеры. На втором этапе проводится сегментация изображения, которая в данном случае используется для выделения основного объекта из окружающей среды для построения более точной карты глубины. Затем осуществляется непосредственное построение карты глубины для выделенного в результате сегментации участка сцены, а на заключительном шаге построенная карта глубины преобразуется в трехмерное представление целевого объекта.

В процессе выполнения проекта был также проведен анализ работ, посвященный обеспечению возможностей по захвату объектов робототехническим средством, который показал, что наибольшей точности определения точек захвата объектов достигает модель нейронной сети 6-DOF GraspNet. Данная модель нейронной сети была выбрана для дальнейшего использования в рамках проекта, поскольку помимо наибольшей точности в определении точек захвата объектов, она также способна верно определять точки захвата для предметов, имеющих более сложную форму (широкие чашки и кружки) и относительно большой размер (коробки), чем существующие аналоги. Согласно результатам проведенного анализа для построения траектории движения робототехнического средства к целевому объекту могут быть использованы распространённые алгоритмы управления, представленные в библиотеке MoveIt, большинство из которых достаточно хорошо справляется с решением этой задачи. По результатам подробного анализа специфики и особенностей применения данных алгоритмов, в рамках проекта было принято решение воспользоваться планировщиком путей RRT-Connect.

В целях разработки подхода к осуществлению робототехническим средством захвата и перемещения объектов окружающей среды с учетом проведенного анализа методов реализации в шагающих роботах сенсорных систем, обеспечивающих анализ поверхностей был разработан собственный емкостной датчик давления для применения в шагающих роботах. Для реализации считывания показаний с первичного емкостного преобразователя давления было разработано схмотехническое решение. Одним из преимуществ разработанного схмотехнического решения является линейная выходная характеристика датчика. Данный факт обусловлен тем, что для получения данных о давлении с емкостного первичного преобразователя давления (ППД), используется не прямое измерение изменяющегося параметра (емкости), а косвенное измерение реактивного сопротивления, которое изменяется линейно в зависимости от расстояния между электродами ППД. Линейное изменение расстояния между электродами ППД в свою очередь обусловлено упругой деформацией материала, расположенного по периметру электродов (силикон). Разработанный емкостной датчик давления измеряет силу в диапазоне, позволяющем использовать его в стопе шагающих роботов малых и средних размеров, и разработать на его основе матрицу сенсоров для анализа поверхностей. Разработанный емкостный ППД прост в изготовлении и не требует применения специальных технологий и материалов, в отличие от тензорезистивных датчиков. Прототип датчика с деформируемым элементом из силикона с имеет чувствительность к приложенному давлению  $0,122 \text{ В/кг}$  и диапазон работы до 5 кг, в котором показания датчика носят линейный характер. Разработанное схмотехническое решение позволяет ставить приложенное к датчику давление в линейное соответствие выходному сигналу, что является важным параметром при эксплуатации сенсорного устройства в опорной конечности робота. Это позволит снизить затраты вычислительных ресурсов на обработку показаний,

получаемых с датчика. Полученные значения циклического дрейфа (0,29 %) значительно ниже, чем у пленочных тензорезистивных датчиков (3-5%) которые чаще всего устанавливают в стопы шагающих роботов.

Кроме того, была разработана методика расчета чувствительности мембранных емкостных сенсоров на основе электретов. Разработанная методика позволяет вычислять статические, динамические и электрические характеристики системы. Предлагаемая методика позволяет сравнительно просто и достаточно точно производить расчет прогибов мембран под действием электростатических сил, оценивать чувствительность электретных емкостных сенсоров мембранного типа, нагруженных на RC-нагрузку и анализировать влияние различных параметров емкостных сенсоров на их характеристики. По предложенной методике проведен расчет характеристик электретного микрофона с заданными параметрами, показавший высокую сходимость с экспериментально полученными характеристиками. Дальнейшие исследования в этой области будут продолжены в направлении разработки матрицы, состоящей из электретных емкостных сенсоров, для последующей установки в робототехнические системы.

Основные результаты работы представлены по ссылке:  
[http://robotics.nw.ru/servis/project\\_detail.php?ID=186&clear\\_cache=Y#section](http://robotics.nw.ru/servis/project_detail.php?ID=186&clear_cache=Y#section)

*на английском языке*

During project execution in 2019 the following outcomes were achieved. An extensive analytic survey of sensor systems in walking robots was performed, ensuring surface analysis. The most promising solutions here premise on integration of pressure and proximity sensors into robotic devices, aimed to analyze surface features of objects in the environment, as well on various cameras and other sensor devices, enabling detection of geometrical features and positions of such objects in the environment. Object approaching can be generally measured with an ultrasound or laser lidar, Doppler locator, as well a capacitive proximity sensor. For use in robot limbs, especially in feet of walking robots, where enough small distances have to be measured, capacitive sensors suit especially well, because sensor devices of these classes are the most compact ones, and relative small-sized array structures can be composed of them, having tiny unit cells. The most common classes of sensors, used to measure applied force/pressure, are force/torque sensors, load sensors and strain gauges, based on piezoresistive and capacitive performance patterns.

According to performed research, to obtain relevant information about features of the surface, robotic device is interacting with, load sensors or force/torque sensors are insufficient; more sophisticated sensing structures are to be employed, based on combinations of various sensing devices. In this vein within this project were reviewed various methods and approaches, concerning combinations of piezoresistive and capacitive sensor devices to analyze possibilities of combined use of pressure and proximity sensors to improve object surface analysis results. Also, current research was analyzed, concerning implementation of combined sensor devices in the limbs of walking robots. Upon performed analysis and our own research were established key requirements to sensor devices, being implemented in the limbs of walking robots; the sensor device must meet certain criteria, regarding sensitivity, operational range, have robust characteristics and be thoroughly protected from dust and moisture. The following prerequisite is also necessary: array sensor structure development, based on this sensor, must be feasible. Because our own research was performed in context of sensor embedding into a walking humanoid robot (Antares), for successful sensor mounting onto bearing surface of the sole of such robotic systems additional requirements were revealed. Particularly, it is necessary, that the relevant device would be as slim as possible, because increase of this parameter in sensor device poorly influences the mechanical features of robot motion: its stability decreases, because gravity center of the whole system shifts; the aggregate weight of the structure increases; additional corrections, related to robotic device motion control, must be respected in kinematic equations.



Upon results of the performed research it was concluded, that today among all existing pressure sensors, piezoresistive film sensor models are most frequently embedded into walking robot limbs, though, devices of this class feature non-linear dependency between resistance and applied pressure, as well shows relatively high measurement error level and instrumental drift. The respective parameters are usually lower in capacitive sensors, thereby certain designs of primary capacitive detectors are enough slim. The performed research also showed, that capacitive sensor devices maintain more robust output signal, compared to layered piezoresistive sensors. Therefore, development of such a capacitive pressure sensor seems promising, what further provides for improvement of accuracy and reliability of relevant measurements. Also, because combination of conceptually different devices is more cumbersome, and their combined use inevitably causes drop in accuracy and reliability of both devices, combination of capacitive pressure sensors and capacitive proximity sensors into a single array structure allows implementing for pressure and approach analysis, which implies a simpler circuit solution and improved feature stability compared to solutions with resistive pressure sensors along with capacitive proximity sensors when establishing combined array structures.

Extended analytical review of machine learning methods was performed to discover surface properties and specifics. Because within this project it is intended to establish an approach to perform robotic grip actions and further object manipulations based on heterogeneous data in cyber-physical environment, the aim of this review was to investigate methods, involved in preparation of virtual three-dimensional object representations. Particularly, image data from cameras may be employed for this, as from fixed cameras, mounted in a cyber-physical environment, as from cameras, installed on robotic devices, integrated into this environment. Hence, during project development various image segmentation methods and on-image object search methods have been analyzed. Upon performed analysis, for further use neural network Mask R-CNN was chosen, remarkable with its fast fine-tuning feature and better performance compared to similar solutions. Additionally, within project various depth map composition methods were investigated, based on stereo-images, based on a single two-dimensional image using a deep convolutional neural network (CNN), using depth sensors (LIDAR, RGB-D camera). Upon performed analysis it was decided to use an approach, based on deep convolutional neural network. To solve the problem of depth map composition an architecture was chosen with nominal SD value of 0,573, because it has fewer trainable parameters and therefore requires smaller datasets, than similar solutions. The architecture of this network is built upon a residual neural network ResNet-50, augmenting the latter one with new blocks, containing fewer weights and simultaneously increasing depth map prediction accuracy.

Within this project also the following issue was considered: how to transform a composed depth map into a three-dimensional object representation. Generally, a three-dimensional object representation can be given as a cloud of points, polygons or voxels. During analysis of relevant research, it was concluded, that the voxel-based approach is the most efficient one, because it spends no resources or bandwidth on such components of vectors or vector representations of data, which are difficult to compress, such as polygons and point clouds. Voxels also are absolutely legitimate to build three-dimensional entities for further analysis and key point search. Upon performed research a custom environment object scanning method was developed, enabling detection of their geometrical characteristics and spatial positions. The developed method implies sequential implementation of the following steps: capture of scene image, segmentation of object area, obtaining depth map, building of three-dimensional object representation. The first step ensures source data preparation to build a three-dimensional model, which are essentially the data, captured with photo- or video-camera. On the second step image segmentation is performed, which is used here to extract the main object from the environment to compose a more accurate depth map. Then follows depth map composition as such, for the scene part, selected during segmentation. At final step the prepared depth map is transformed into the three-dimensional representation of the target object.

Within this project also research analysis was performed, concerning possibilities of object grasp by a robotic device, which showed, that the highest accuracy of object grasp by robotic devices is achieved with a neural network model 6-DOF GraspNet. This neural network model was chosen for further use within the project, because it not only ensures the highest accuracy in object grasp point detection, but also correctly detects grasp points for complex-shaped things (such as broad cups and mugs) and relatively big things (boxes), compared to similar solutions. The performed analysis shows, that to trace the path of a robotic vehicle to the target object common control algorithms may be employed, contained in the MoveIt library, the majority of the, solves this task with decent success. Upon extensive analysis of specifics and application peculiarities of these algorithms it was decided to use path tracer RRT-Connect within this project.

To develop an approach, enabling a robotic device to grip and move objects in the environment with regard to performed analysis of implementation of surface exploration sensor system implementation in walking robots, a custom capacitive pressure sensor was developed, intended for use in walking robots. To implement readings, capture from the primary capacitive pressure transducer a dedicated circuit solution was developed. One of the advantages of this solution is the linear output characteristic of the sensor. This is explained as follows: to obtain pressure data from the primary capacitive pressure transducer, the changing parameter (capacity) is not measured directly; instead, reactance is indirectly measured, which changes linearly, depending on the distance between transducer electrodes. In turn, linear change of distance between the transducer electrodes is caused by elastic deformation of stuff, framing the electrodes (i. e. silicone). The developed capacitive pressure sensor measures force in such range, that provides for using it in feet of small and medium-sized walking robots and develop a sensor array for surface analysis, based on it. The developed capacitive pressure transducer is easy to fabricate and requires no specific technologies and materials in contrast to piezoresistive sensors. The prototype sensor with yielding silicone part shows applied pressure sensitivity of 0,122 V/kg and operational range up to 5 kg, where sensor readings remain linear. The developed circuit solution allows to trace linear relationship between the pressure applied to sensor and the output signal, being an important parameter in sensor device operation in a bearing limb of the robot. This allows decreasing computing costs for processing of data, obtained from the sensor. The resulting cyclic drift values (0,29 %) are significantly lower, than by piezoresistive film sensors (3-5%), most frequently embedded in the feet of walking robots.

Also, a methodology was developed for sensitivity calculation in electret diaphragm capacitive sensors. This methodology enables calculation of static, dynamic and electric characteristics of the system. It ensures relative simple and enough accurate deflection calculation for a diaphragm, acted upon by electrostatic forces, estimate sensitivity of electret capacitive RC-loaded diaphragm sensors and analyze influence of various parameters of capacitive sensors on their characteristics. The proposed methodology was used in calculation of characteristics of an electret microphone with predefined parameters, showing high convergence with experimentally obtained values. Further research in this domain will be continued towards development of an electret capacitive sensor array, which could be later embedded into robotic systems.

#### **Перечень публикаций за 2019 год по результатам проекта:**

1. Ватаманюк И.В., Яковлев Р.Н. (Vatamaniuk I., Iakovlev R.) Обобщенные теоретические модели киберфизических систем Известия Юго-Западного государственного университета (2019 г.) РИНЦ
2. Ковалев А.Д., Павлюк Н.А., Крестовников К.Д., Савельев А.И. (Kovalev A., Pavliuk, N., Krestovnikov, K., Saveliev, A.) Generation of Walking Patterns for Biped Robots Based on Dynamics of 3D Linear Inverted Pendulum International Conference on Interactive Collaborative Robotics; Lecture Notes in Artificial Intelligence (2019 г.) SCOPUS РИНЦ
3. Савельев А.И., Пшелко Н.С., Крестовников К.Д. (Saveliev A.I., Pshchelko N.S., Krestovnikov K.D.) Method of sensitivity calculation for electrete diaphragm capacitive sensors Proceedings of the 12th International Conference on the Developments in eSystems Engineering

(DeSE2019) (2019 г.) WOS SCOPUS РИНЦ

4. Яковлев Р.Н., Ватаманюк И.В., Малов Д.А. (Iakovlev R., Vatamaniuk I., Malov D.) Architecture Transformation of the Corporate Information Providing System for a Scientific Organization Proceedings of the 12th International Conference on the Developments in eSystems Engineering (DeSE2019) (2019 г.) WOS SCOPUS РИНЦ

### Список литературы

1. Gienger M., Loffler K., Pfeiffer F. Towards the design of a biped jogging robot //Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164). – IEEE, 2001. – Т. 4. – С. 4140-4145.

2. Хусаинов Р. Р. Система управления движением двуногого шагающего робота //Дис. на соиск. степени канд. техн. наук. Казань. -2018.-196 с. – 2018.

3. Erbatur K. et al. A study on the zero moment point measurement for biped walking robots //7th International Workshop on Advanced Motion Control. Proceedings (Cat. No. 02TH8623). – IEEE, 2002. – С. 431-436.

4. Yasin A. et al. Design of a 23-DoF small humanoid robot with ZMP force sensors //Informatics in Control, Automation and Robotics. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. – С. 31-38.

5. Prahlad V., Dip G., Meng-Hwee C. Disturbance rejection by online ZMP compensation //Robotica. – 2008. – Т. 26. – №. 1. – С. 9-17.

6. Choi K. C., Lee H. J., Lee M. C. Fuzzy posture control for biped walking robot based on force sensor for ZMP //2006 SICE-ICASE International Joint Conference. – IEEE, 2006. – С. 1185-1189.

7. Li J. et al. Flexible foot design for a humanoid robot //2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics. – IEEE, 2008. – С. 1414-1419.

8. Kagami S. et al. High-speed matrix pressure sensor for humanoid robot by using thin force sensing resistance rubber

9. Quesada P. M., Rash G. S. Quantitative assessment of simultaneous capacitive and resistive plantar pressure measurements during walking //Foot & ankle international. – 2000. – Т. 21. – №. 11. – С. 928-934.sheet //SENSORS, 2004 IEEE. – IEEE, 2004. – С. 1534-1537.

10. Strohmeier P. et al. zPatch: Hybrid resistive/capacitive etextile input //Proceedings of the Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction. – ACM, 2018. – С. 188-198.

11. Rocha R. et al. Soft-matter sensor for proximity, tactile and pressure detection //2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2017. – С. 3734-3738.

12. Cheng Y. et al. Stretchable electronic skin based on silver nanowire composite fiber electrodes for sensing pressure, proximity, and multidirectional strain //Nanoscale. – 2017. – Т. 9. – №. 11. – С. 3834-3842.

13. Pang L. et al. Enhanced pressure & proximity sensitivities of a flexible transparent capacitive sensor with PZT nanowires //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 479. – №. 1. – С. 012035.

14. Cannata G. et al. An embedded artificial skin for humanoid robots //2008 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems. – IEEE, 2008. – С. 434-438.

15. Hua Q. et al. Skin-inspired highly stretchable and conformable matrix networks for multifunctional sensing //Nature communications. – 2018. – Т. 9. – №. 1. – С. 244.

16. Lai Y. C. et al. Actively Perceiving and Responsive Soft Robots Enabled by Self-Powered, Highly Extensible, and Highly Sensitive Triboelectric Proximity-and Pressure-Sensing Skins //Advanced Materials. – 2018. – Т. 30. – №. 28. – С. 1801114.] [Bu D. et al. High transparency flexible sensor for pressure and proximity sensing //Modern Physics Letters B. – 2018. – Т. 32. – №. 32. – С. 1850394.

17. Hasegawa H. et al. Development of intelligent robot hand using proximity, contact and slip sensing //2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 2010. – С. 777-784.
18. ГОСТ 8.631-2013 Датчики весоизмерительные Общие технические требования. Методы испытаний.
19. Lin K.Y., Hang H.M. Depth Map Enhancement on RGB-D Video Captured by Kinect V2. 2018 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), 2018, pp. 1530-1535.
20. Altukhov V.G., Kolker A.B. Vychislenie rasstoyaniya do ob"ekta na osnove karty glubin poluchennoi metodom zerkal'nogo razdeleniya izobrazhenii [Calculation of the distance to the object based on the depth map obtained by the method of mirror image separation]. Avtomatika i programmnyaya inzheneriya = Automation and Software Engineering, 2017, no. 1, pp. 65-69 (In Russ.).
21. Hu J., Ozay M., Zhang Y., Okatani T. Revisiting single image depth estimation: toward higher resolution maps with accurate object boundaries. 2019 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), 2019, pp. 1043-1051.
22. I. Laina, C. Rupprecht, V. Belagiannis, F. Tombari, N. Navab; Deeper Depth Prediction with Fully Convolutional Residual Networks, 2016.
23. He K. et al. Deep residual learning for image recognition //Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2016. – С. 770-778.
24. C. Kerl, J. Sturm, and D. Cremers. Robust odometry estimation for RGB-D cameras. In Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 2013.
25. Charles R. Qi, Li Yi, Hao Su, Leonidas J. Guibas, PointNet++: Deep Hierarchical Feature Learning on Point Sets in a Metric Space, 2017
26. Dynamic Graph Cnn for Learning on Point Clouds, 2018
27. Shaoshuai Shi, Xiaogang Wang, Hongsheng Li, PointRCNN: 3D Object Proposal Generation and Detection from Point Cloud, 2019
28. A. Dai, M. Niebner, Scan2Mesh: From Unstructured Range Scans to 3D Meshes, 2019
29. Y. Feng, Y. Feng, H. You, X. Zhao, Y. Gao, MeshNet: Mesh Neural Network for 3D Shape Representation
30. J. Hou, A. Dai, M. Niebner, 3D-SIS: 3D Semantic Instance Segmentation of RGB-D Scans, 2019
31. J. Hou, M. Niebner, A. Dai, 3D-SIC: 3D Semantic Instance Completion for RGB-D Scans, 2019
32. A. Dai, D. Ritchie, M. Bokeloh, S. Reed, J. Sturm, M. Niebner, ScanComplete: Large-Scale Scene Completion and Semantic Segmentation for 3D Scans, 2018
33. A. Dai, A. X. Chang, M. Savva, M. Halber, T. Funkhouser, M. Niebner, ScanNet: Richly-annotated 3D Reconstructions of Indoor Scenes
34. A. Mousavian, C. Eppner, D. Fox, 6-DOF GraspNet: Variational Grasp Generation for Object Manipulation, 2019
35. A. Zeng, S. Song, S. Welker, J. Lee, A. Rodrigues, T. Funkhouser, Learning Synergies between Pushing and Grasping with Self-supervised Deep Reinforcement Learning, 2018
36. Quanquan Shao , Jie Hu, Weiming Wang, Yi Fang, Wenhai Liu, Jin Qi, Jin Ma, Suction Grasp Region Prediction using Self-supervised Learning for Object Picking in Dense Clutter, 2019
37. Matthieu Grard, Romain Br'egier, Florian Sella, Emmanuel Dellandrea, Liming Chen, Object segmentation in depth maps with one user click and a synthetically trained fully convolutional network, 2018
38. Coleman, David, et al. "Reducing the barrier to entry of complex robotic software: a moveit! case study." arXiv preprint arXiv:1404.3785 (2014)

39. Kuffner, James J., and Steven M. LaValle. "RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning." Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065). Vol. 2. IEEE, 2000.