

ОБЗОР И АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ФАЛАНГ ПАЛЬЦЕВ ОПЕРАТОРА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ АНТРОПОМОРФНЫМ ЗАХВАТНЫМ УСТРОЙСТВОМ В КОПИРУЮЩЕМ РЕЖИМЕ

Г. К. Тевяшов

glebtevyashov96@yandex.ru

SPIN-код: 8883-4841

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Статья посвящена обзору и анализу различных подходов к определению движения кистей рук оператора с целью формирования законов управления антропоморфным хватным устройством в копирующем режиме. Выполнен обзор различных методов, позволяющих определять движения фаланг пальцев оператора и основанных на использовании датчиков изгиба, системы локализации источников звука, микроэлектромеханических систем (МЭМС-датчиков), датчиков угла поворота и системы технического зрения. Проведен анализ каждого метода, выявлены их преимущества и недостатки. Описаны принципы работы задающих устройств, базирующихся на рассмотренных методах. Обоснован выбор методов, которые будут использованы для разработки антропоморфного хватного устройства, работающего в копирующем режиме.

Ключевые слова

Антропоморфное хватное устройство, схват, система технического зрения, акселерометр, тензорезистор, гироскоп, копирующий режим, методы считывания движения

Поступила в редакцию 07.06.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. В настоящее время во многих сферах жизни прослеживается устойчивая тенденция перехода к роботизированным технологиям. Главным достижением робототехнических систем является возможность выполнения манипуляционных операций, например, перемещение различных предметов, их сборка или разборка, при достаточном удалении человека от операционной зоны. Особенно актуальными являются вопросы роботизации операций при работе в экстремальных условиях — в подводном и космическом пространстве, — а также при работе с опасными для человека предметами, содержащими взрывоопасные или токсичные вещества.

На данный момент такие роботизированные операции реализуются главным образом в результате применения копирующего режима управления при постоянном нахождении оператора в контуре управления роботом. Главная проблема копирующего режима — существенная сложность управления исполнительным механизмом с помощью кнопок и джойстиков, расположенных на пульте управления. Это приводит к увеличению психологической нагрузки на оператора, что повышает риск ошибочного принятия решения (человеческий

фактор), а это, в свою очередь, может привести к разрушению захваченного предмета или его выпадению из захватного устройства манипулятора.

Таким образом, задача разработки способа управления многопальным захватным устройством, особенно в части интерфейса управления, доступного для операторов, обладающих различными биометрическими данными, для выполнения задач ловкого манипулирования предметами, несомненно, является актуальной.

Использование датчика изгиба для определения движений фаланг пальцев оператора. Для получения информации о механическом изгибе, обусловленном движением пальцев оператора, применяют специальные датчики в виде тонкой длинной резистивной полоски. Такой датчик меняет свое сопротивление в зависимости от величины изгиба. То есть он преобразует изменение механической структуры в электрическое сопротивление, при этом чем больше изгиб, тем больше значение сопротивления.

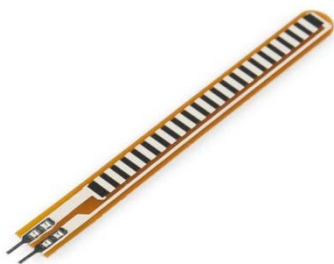


Рис. 1. Резистор FS-L-0055-253-ST

Одна из запатентованных технологий изготовления датчика изгиба основана на резистивных углеродных элементах (рис. 1). Благодаря тому что это переменный печатный резистор, его можно сделать довольно длинным на тонкой гибкой подложке. Когда подложка согнута, на выходе датчика присутствует некоторое сопротивление, соответствующее радиусу изгиба [1].

В Калифорнийском университете в Сан-Диего разработано устройство Sign Language Gloves [2]. Оно представляет собой перчатку (рис. 2), в которую интегрированы датчики изгиба, предназначенные для конвертации языка жестов в текст на экране компьютера или смартфона.

Когда оператор сгибает любой из своих пальцев, перчатка получает сигнал. После этого встроенное программное обеспечение получает электрический входной сигнал и высчитывает точную конфигурацию кисти руки оператора.

Преимуществом задающего устройства, основанного на использовании датчиков изгиба, является высокая точность определения конфигурации кисти оператора. В частности, перчатка Sign Language Gloves позволяет различать схожие движения пальцев, соответствующие различным буквам. Например, буквы Z и G задаются сгибанием указатель-



Рис. 2. Устройство Sign Language Gloves

ного пальца, однако букве G соответствует горизонтальное расположение пальца, а букве Z — вертикальное. Кроме того, несомненным преимуществом задающего устройства, основанного на применении датчиков изгиба, является его небольшая масса. Серьезный недостаток таких устройств — их высокая стоимость.

Использование системы локализации источников звука для определения движений фаланг пальцев оператора. За последние три десятилетия достигнут значительный прогресс в точности локализации источника звука, повысилась надежность результатов, были решены проблемы шума и реверберации [3], которые 50 лет назад казались неразрешимыми. Определение расстояния до источника звука, основанное исключительно на использовании аудиоданных, пока несовершенно. Однако тенденции развития в данном направлении четко указывают, что в скором времени этот вопрос будет решен [4].

На рис. 3 показано устройство Nintendo Power Glove [5], которое было выпущено в 1989 г.

В перчатку встроены джойстик и несколько дополнительных кнопок, предназначенных для набора программного кода игр. На пальцы перчатки нанесены карбоновые чернила, передающие сигналы в разъем джойстика, которые соответствуют сжатию и растяжению. В перчатке имеются два ультразвуковых динамика-трансммиттера, передающие звук на частоте 40 кГц, неслышимый для человеческого уха. В ответную часть, расположенную на телевизоре, встроены три микрофона-ресивера, которые принимают звуки от перчатки и вычисляют ее положение и ориентацию в пространстве.

Недостатком задающих устройств, основанных на системах локализации источников звука, является невозможность определения конфигурации кисти, а только ее положения и ориентации в пространстве. Кроме того, отсутствует возможность управления в шумной обстановке, поскольку посторонние источники звука искажают принимаемые ресивером аудиоданные.

Использование МЭМС-датчиков для определения движений фаланг пальцев оператора. Активно развивающиеся технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) [6] сделали доступными для применения в недорогих массовых устройствах датчики и системы измерения параметров, которые ранее использовались лишь в дорогой авиационной, космической и военной технике. Особенно это относится к датчикам для измерения параметров движения — инерциальным датчикам (гироскопам, акселерометрам), датчикам вибрации, давления, наклона и т. д. Рассмотрим датчики и инерциальные измерительные модули, уже доступные российским разработчикам. При этом основное внимание уделим моделям с высокими точностными характеристиками и хорошей стабильностью показаний.



Рис. 3. Устройство Nintendo Power Glove

Чрезвычайно малый размер позволяет использовать МЭМС в различных миниатюрных устройствах, начиная от механических часов и заканчивая имплантатами для человека.

Самыми распространенными МЭМС-устройством является акселерометры, гироскопы и магнитометры.

Акселерометр — устройство для измерения ускорения в одном или нескольких направлениях. Микроакселерометры можно определить как акселерометры, созданные с помощью технологий микроэлектроники и являющиеся МЭМС. Его характерной особенностью является малый размеры — не более нескольких десятков миллиметров. Наиболее распространенными применениями акселерометров являются мобильные телефоны, автомобильное производство, элементы компьютерной техники, игровые консоли и т. д. Принцип работы акселерометров основан на измерении смещения инерционной массы относительно корпуса и преобразовании его в пропорциональный электрический сигнал. Емкостной метод преобразования измеренного перемещения является наиболее точным и надежным, поэтому емкостные акселерометры получили широкое распространение [7]. Современные интегральные датчики изготавливают на кристалле кремния по технологии iMEMS (integrated Micro Electro Mechanical System). Структура датчика представляет собой кремниевую подложку, на которой расположен чип, датчики и схема усиления сигнала.

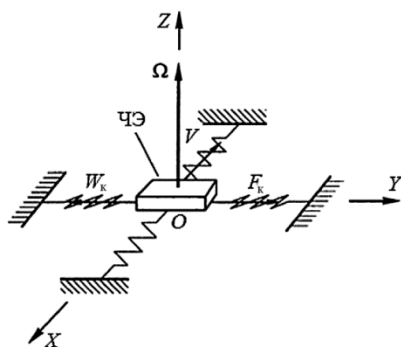


Рис. 4. Принцип работы гироскопа

Гироскоп — устройство для измерения изменения углов ориентации объекта, на котором оно установлено, относительно инерциальной системы отсчета. Его основное предназначение заключается в измерении угловых скоростей относительно одной или нескольких осей. Известно много разнообразных схем микромеханических гироскопов (ММГ). Общим конструктивным признаком ММГ является наличие вибрационных датчиков угловой скорости и использование в них различных по конфигурации двух-

степенных упругих подвесов чувствительного элемента (ЧЭ). Принцип работы ММГ заключается в создании относительно корпуса знакопеременного поступательного либо вращательного движения ЧЭ по одной из степеней свободы и измерении перемещений по другой степени свободы, возникающих под действием кориолисовых сил или гироскопических моментов при наличии переносной угловой скорости корпуса. На рис. 4 этот принцип поясняется на примере ММГ с двухстепенным упругим подвесом и поступательными перемещениями ЧЭ.

При наличии знакопеременной относительной линейной скорости V вдоль оси OX и переносной измеряемой угловой скорости Ω вокруг оси OZ появляются

ся знакопеременное ускорение Кориолиса W_k и соответствующая ему сила F_k вдоль оси OY .

Магнитометр представляет собой устройство для измерения интенсивности одной или нескольких составляющих магнитного поля [8].

Изобретенное более тысячи лет назад такое простое, но в то же время гениальное устройство, как компас, и сегодня является незаменимой вещью в инвентаре любого капитана корабля или туриста. В наше время благодаря развитию электроники и технологии микроэлектронных механических систем появились МЭМС-магнитометры, предоставляющие функцию компаса в микросхемном исполнении. Сегодня их повсеместно можно встретить в потребительских электронных устройствах (смартфонах, планшетах), автомобилях, робототехнике и т. п. Зачастую они входят в состав сложных навигационных систем, а в сочетании с акселерометром и/или гироскопом представляют собой инерциальную систему, способную точно определять местоположение в трехмерном пространстве. Сегодня рынок предоставляет широкий выбор двух- и трехосевых электронных компасов в интегральном исполнении.

На рис. 5 представлено устройство управления жестами четырех пальцев, которое разработала компания Apotact Labs, под названием Gest. Это устройство позволяет управлять компьютером и мобильным устройством с помощью одной руки [9].

Устройство Gest прикрепляется к руке с помощью регулируемых ремней и креплений, и подходит для операторов с различными биометрическими данными, что является несомненным преимуществом такого задающего устройства. Устройство содержит 15 дискретных датчиков, на каждом пальце есть стандартный акселерометр, гироскоп и магнитометр, что приводит к удорожанию реализации такого концепта.

Отличительной особенностью и в то же время преимуществом является миниатюрный размер МЭМС-датчиков. Вследствие этого конструкция с использованием таких датчиков будет значительно меньше по габаритам и весу. Однако при использовании данного типа датчиков присутствует существенный недостаток — он заключается в том, что для получения более точной информации нужно использовать большее количество датчиков, что приводит к увеличению себестоимости прототипа.

Использование датчиков угла поворота для определения движений фаланг пальцев оператора. Датчики угла поворота — энкодеры — отвечают таким требованиям, как точность, надежность, повышенная износостойчивость в течение длительного периода эксплуатации. Они подразделяются на инкрементальные и абсолютные. Абсолютные энкодеры, в свою очередь, могут быть оптическими и магнитные [10].



Рис. 5. Устройство Gest

Инкрементальные энкодеры предназначены для определения скорости вращения и угла поворота вращающихся объектов. Они генерируют последовательный импульсный цифровой код, содержащий информацию относительно угла поворота объекта. Если вал останавливается, то останавливается и передача импульсов. Основным рабочим параметром датчика является количество импульсов за один оборот. Мгновенную величину угла поворота объекта определяют посредством подсчета импульсов от старта. Для вычисления угловой скорости объекта процессор в тахометре выполняет дифференцирование числа импульсов во времени, сразу показывая значение скорости, т. е. число оборотов в минуту. Выходной сигнал имеет два канала, в которых идентичные последовательности импульсов сдвинуты на 90° относительно друг друга, что позволяет определять направление вращения. Имеется также цифровой выход нулевой метки, который позволяет всегда рассчитать абсолютное положение вала.

Абсолютные энкодеры, как оптические, так и магнитные, имеют своей основной рабочей характеристикой число шагов, т. е. уникальных кодов на оборот и количество таких оборотов, при этом не требуется первичной установки и инициализации датчика.

Оптические энкодеры имеют жестко закрепленный соосно валу стеклянный диск с прецизионной оптической шкалой. При вращении объекта оптопара считывает информацию, а электроника преобразует ее в последовательность дискретных электрических импульсов. Абсолютные оптические энкодеры — это датчики угла поворота, где каждому положению вала соответствует уникальный цифровой выходной код, который наряду с числом оборотов является основным рабочим параметром датчика. Абсолютные оптические энкодеры, так же как и инкрементальные энкодеры, считывают и фиксируют параметры вращения оптического диска.

Магнитные энкодеры с высокой точностью регистрируют прохождение магнитных полюсов вращающегося магнитного элемента непосредственно вблизи чувствительного элемента, преобразуя эти данные в соответствующий цифровой код.

На рис. 6 представлено устройство поворота Dexmo для определения движений фаланг пальцев оператора [11].

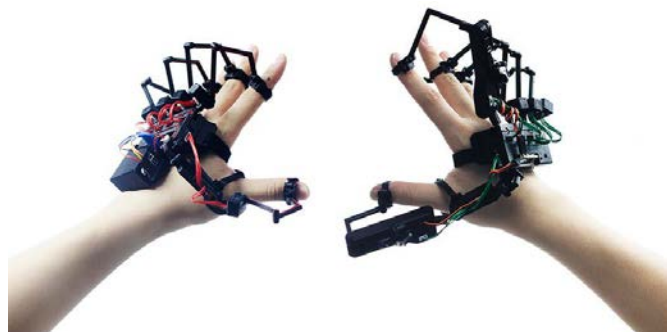


Рис. 6. Устройство Dexmo

В базовой модели Dextro Classic используются относительно недорогие вращательные датчики для захвата движений вашей руки по 11 степеням свободы. Dextro Classic определяет вращение пальца, изгиб отдельных пальцев, а также степень их разведения друг от друга. Для захвата движений используется одно инерционное измерительное устройство (ИДУ), кроме того, отслеживаются движения руки в пространстве по координатам X, Y и Z.

С этой версией устройства пользователи могут манипулировать аватарами на экране с помощью отдельных пальцев, создавать анимированные модели рук, управлять роботами или программным приложением в реальном мире, используя жесты, или даже переводить язык жестов в текст.

Модель Dextro F2 имеет обратную связь с манипулируемыми предметами. Она делает это с помощью контролируемых дисковых тормозов в отдельных суставах пальцев аппарата, которые физически передают усилие на один или более реальных пальцев пользователя, когда соответствующие виртуальные пальцы захватывают виртуальный предмет. Эта функция позволяет пользователям получить ощущение усилий, действующих на самом деле, хотя она работает только в двух режимах — шарниры либо движутся свободно, либо стопорятся.

При использовании датчиков поворота можно получить точное положение фаланги пальца, но с увеличением точности возрастает цена. Также энкодеры имеют конечную точность измерений, обусловленную строением датчика. Вдобавок заметный недостаток при использовании данного типа датчиков — это громоздкость конструкции задающего устройства.

Использование системы технического зрения для определения движений фаланг пальцев оператора. Техническое зрение — теория и технология создания машин, которые могут производить обнаружение, слежение и классификацию предметов. Как научная дисциплина компьютерное зрение относится к теории и технологии создания искусственных систем, которые получают информацию из изображений. Видеоданные могут быть представлены множеством форм, таких как видеопоследовательность, изображения с различных камер, или трехмерными данными. Существуют четыре основных задачи технического зрения [12].

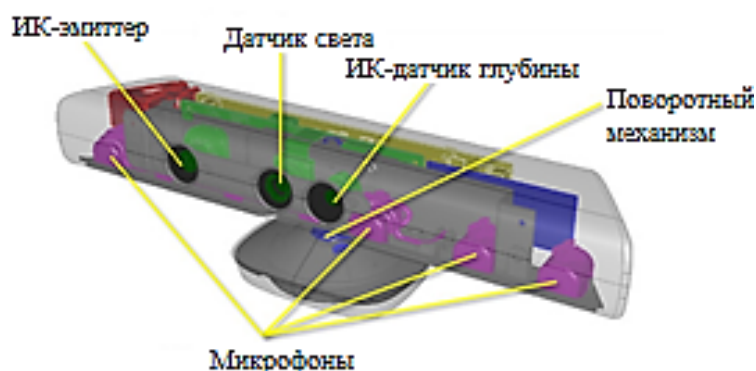


Рис. 7. Основные элементы камеры Kinect

Технология распознавания жестов от компании Microsoft с использованием камеры их производства Kinect (рис. 7) основана на определении расстояния до объекта с помощью источников инфракрасного излучения и сенсоров, которые регистрируют отраженный свет [13].

Эту технологию успешно использовали студенты из Самарского национального исследовательского университета [14]. В их статье описана система захвата движения на основе Kinect и оригинального устройства считывания движения рук (рис. 8). Также с помощью гироскопов и акселерометров измеряются углы наклона по отношению к оси системы датчика, в то же время потенциометры определяют углы сгиба фаланги пальца. Полученные данные о траектории движения трансформируются в движения робота.

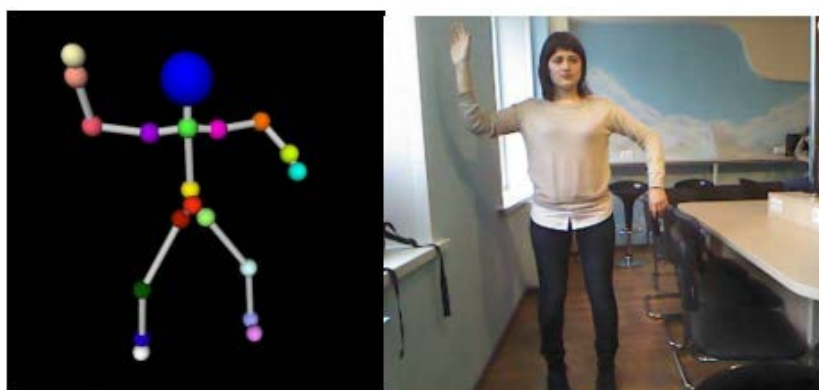


Рис. 8. Пример схематичного снимка, сделанного с помощью Kinect

Неоспоримым преимуществом данного метода является легкость в использовании. Это выражается в том, что оператор не взаимодействует ни с какими дополнительными конструкциями. Программным методом и применением камеры с высоким разрешением можно получить точную картинку перемещения фаланг пальцев на минимальном интервале времени. В противовес точным измерениям ставится высокая цена, что является существенным недостатком такого метода распознавания.

Заключение. В ходе работы исследованы методы получения информации о движении фаланг пальцев оператора для формирования законов управления антропоморфным хватным устройством в копирующем режиме. Рассмотрены существующие разработки по описанным методам. При выборе и анализе информации рассмотрены не только разработки в области робототехники, но и разработки в области цифровой индустрии, области управления компьютерными системами и в области медицины.

На основе проведенного анализа в качестве метода получения информации о движении фаланг пальцев оператора для задающего устройства, которое будет разрабатываться автором впоследствии, выбран комбинированный метод снятия информации. Предполагается, что в системе одновременно будут использоваться датчики угла поворота и МЭМС-датчики. Такой выбор обусловлен ми-

нимизацией стоимости прототипа, обеспечивающего достаточно высокую точность и скорость определения положения фаланг пальцев оператора.

Литература

- [1] Физическая энциклопедия. Т. 5. М., Большая российская энциклопедия, 1998.
- [2] Sign language gloves! *hearinghealthcarecentre.co.uk: веб-сайт*. URL: <https://www.hearinghealthcarecentre.co.uk/sign-language-gloves> (дата обращения: 10.03.2019).
- [3] Беранек Л. Акустические измерения. М., Изд-во иностр. лит., 1952.
- [4] Фурдуев В.В. Акустические основы вещания. М., Связьиздат, 1960.
- [5] Полушкин Д.П. Система определения источника звука, применяемая в робототехнике. *Наука без грани*, 2018, № 3(20), с. 33–35.
- [6] How the Nintendo power glove work. *edelectronics.howstuffworks.com: веб-сайт*. URL: <https://electronics.howstuffworks.com/nintendo-power-glove.htm> (дата обращения: 14.03.2019).
- [7] Тузов А. Датчики для измерения параметров движения на основе MEMS технологии. Часть 1. Инерциальные датчики средней точности. *Электроника: наука, технология, бизнес*, 2011, № 1, с. 72–78.
- [8] Андроник М.М., Бочков С.Д., Габидуллин А.Р. и др. Микроэлектромеханические устройства. Акселерометры и гироскопы. *Всерос. науч.-тех. конф. студентов «Студенческая научная весна»*, 2016. URL: <http://studvesna.ru/?go=articles&id=1662>
- [9] Русских М. Магнитометры: принцип действия, компенсация ошибок. *Радиолюцман*, 2012, № 9. URL: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=143960>
- [10] Перчатки Gest позволяют управлять жестами. *json.tv: веб-сайт*. URL: http://json.tv/tech_trend_find/perchatki-gest-20151103121920 (дата обращения: 19.03.2019).
- [11] [Датчики угла поворота — энкодеры, датчики угла наклона — инклинометры. *germany-electric.ru: веб-сайт*. URL: http://www.germany-electric.ru/doc/IVO/IVO_Applikation.pdf (дата обращения: 21.03.2019).
- [12] Dexta Robotics: веб-сайт компании. URL: <https://www.dextarobotics.com/> (дата обращения: 25.03.2019).
- [13] Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических систем. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.
- [14] How Microsoft Kinect works. *edelectronics.howstuffworks.com: веб-сайт*. URL: <https://electronics.howstuffworks.com/microsoft-kinect.htm> (дата обращения: 27.03.2019).
- [15] Pliukhin V.N., Mitkovskii K.B., Bizyanova D.A., et al. The development of motion capture system based on Kinect sensor and Bluetooth-gloves. *Procedia Eng.*, 2017, vol. 176, pp. 506–513. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.350 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817308664>

Тевяшов Глеб Константинович — магистрант кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Селиверстова Елена Владимировна, ассистент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

REVIEW AND ANALYSIS OF EXISTING METHODS FOR DETERMINING THE MOVEMENT OF THE PHALANGES OF OPERATOR'S FINGERS TO FORM THE CONTROL LAWS OF AN ANTHROPOMORPHIC GRIPPER IN COPY MODE

G.K. Tevyashov

glebtevyashov96@yandex.ru

SPIN-code: 8883-4841

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article is devoted to the review and analysis of various approaches to determining the movement of the operator's hands in order to formulate control laws for an anthropomorphic gripping device in copy mode. Authors performed a review of various to determine the movements of the phalanges of the operator's fingers; these methods use bend sensors, a localization system for sound sources, microelectromechanical systems (MEMS sensors), rotation angle sensors, or a computer vision system. An analysis of each method is carried out, their advantages and disadvantages are revealed. The principles of operation of the master devices based on the considered methods are described. The choice is justified of methods that will be used to develop an anthropomorphic gripper operating in copy mode.

Keywords

Anthropomorphic gripper, gripper, computer vision system, accelerometer, resistive strain sensor, gyroscope, copy mode, motion sensing methods

Received 07.06.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Fizicheskaya entsiklopediya. T. 5 [Physical encyclopedia. Vol. 5]. Moscow, Bol'shaya rossiyskaya entsiklopediya Publ., 1998 (in Russ.).
- [2] Sign language gloves! *hearinghealthcarecentre.co.uk: website*. URL: <https://www.hearinghealthcarecentre.co.uk/sign-language-gloves> (accessed: 10.03.2019).
- [3] Beranek L.L., Acoustical Measurements. John Wiley & Sons, 1949. (Russ. ed.: Akusticheskie izmereniya. Moscow, Izd-vo inostr. lit. Publ., 1952.)
- [4] Furduev V.V. Akusticheskie osnovy veshchaniya [Acoustic measurements]. Moscow, Svyaz'izdat Publ., 1960 (in Russ.).
- [5] Polushkin D.P. System of determination of sound source used in robotics. *Nauka bez granits*, 2018, no. 3(20), pp. 33–35 (in Russ.).
- [6] How the Nintendo power glove work. *edelectronics.howstuffworks.com: website*. URL: <https://electronics.howstuffworks.com/nintendo-power-glove.htm> (accessed: 14.03.2019).
- [7] Tuzov A. Detectors for measuring motion parameters based on MEMS technology. Part 1. Inertial detectors of mean accuracy. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2011, no. 1, pp. 72–78 (in Russ.).
- [8] Andronik M.M., Bochkov S.D., Gabidullin A.R., et al. [Microelectromechanic devices. Accelerometers and gyroscope]. *Vseros. nauch.-tekh. konf. studentov Studencheskaya nauchnaya vesna* [Russ. Sci.-Tech. Conf. of Students "Student's Science Spring"], 2016. URL: <http://studvesna.ru/?go=articles&id=1662> (in Russ.).

- [9] Russkikh M. Magnetometers: operating principle, error compensation. *Radiolotsman* [Radiolocman], 2012, no. 9. URL: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=143960> (in Russ.).
- [10] Perchatki Gest pozvolyayut upravlyat' zhestami [Gest gloves provide gesture control]. *json.tv: website* (in Russ.). URL: http://json.tv/tech_trend_find/perchatki-gest-20151103121920 (accessed: 19.03.2019).
- [11] Datchiki ugla povorota — enkodery, datchiki ugla naklona — inklinometry [Rotation angle detectors – encoders, inclination angle detectors – inclinators]. *germany-electric.ru: website* (in Russ.). URL: http://www.germany-electric.ru/doc/IVO/IVO_Applikation.pdf (accessed: 21.03.2019).
- [12] Dexta Robotics: company website. URL: <https://www.dextarobotics.com/> (accessed: 25.03.2019).
- [13] Vorotnikov S.A. Informatsionnye ustroystva robototekhnicheskikh system [Information devices of robotic systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2005 (in Russ.).
- [14] How Microsoft Kinect works. *edelectronics.howstuffworks.com: website*. URL: <https://electronics.howstuffworks.com/microsoft-kinect.htm> (accessed: 27.03.2019).
- [15] Iliukhin V.N., Mitkovskii K.B., Bizyanova D.A., et al. The development of motion capture system based on Kinect sensor and Bluetooth-gloves. *Procedia Eng.*, 2017, vol. 176, pp. 506–513. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.350 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817308664>

Tevyashov G.K. — M. Sc. Student, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Seliverstova E.V., Assist. Professor, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.