

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТ МНОГОСУСТАВНОЙ КИСТИ РУКИ

Чунг Ч.Т., Меркурьев И.В., Сайпулаев Г.Р.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

Ключевые слова: аппаратно-программный комплекс, оценка координат, дистанционное управление, сенсорные робототехнические перчатки, роботизированная рука, магнитометр, погрешности измерений.

Аннотация. В статье авторами предложен аппаратно-программный комплекс, предназначенный для дистанционного управления движением робототехническим комплексом с использованием сенсорной перчатки для передачи движения кисти руки. Целью работы является создание аппаратно-программного комплекса, включающего в себя сенсорную, силовую приводную части, а также программное обеспечение для обработки больших объемов данных о движении многосуставной кисти человека для построения управления движением сложной технической системы в изменяющейся помехо-сигнальной обстановке. Основное внимание уделяется математическому моделированию измерений магнитометра, закрепленного на кончике пальца робототехнической перчатки, и проведению экспериментальных исследований, подтверждающих возможность измерения расстояния и углов ориентации звеньев роботизированной руки. По результатам эксперимента продемонстрирована корректность математической модели и вычислены характеристики погрешностей измерений магнитометра.

DEVELOPMENT OF A COMPLEX MATHEMATICAL MODEL FOR ASSESSING THE LEVEL OF ERRORS IN DETERMINING THE COORDINATES OF A MULTI-JOINT HAND

Chung T.T., Merkurjev I.V., Saypulaev G.R.

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow

Keywords: hardware-software complex, coordinate estimation, remote control, sensor robotic gloves, robotic hand, magnetometer, measurement errors.

Abstract. In the article, the authors propose a hardware and software complex designed for remote control of the movement of a robotic complex using a touch glove to transmit the movement of the hand. The goal of the work is to create a hardware and software complex that includes sensory, power drive parts, as well as software for processing large volumes of data on the movement of a multi-joint human hand to build control of the movement of a complex technical system in a changing noise-signal environment. The main focus is on mathematical modeling of measurements from a magnetometer attached to the fingertip of a robotic glove and conducting experimental studies to confirm the ability to measure the distance and orientation angles of robotic arm links. Based on the results of the experiment, the correctness of the mathematical model was demonstrated and the characteristics of the magnetometer measurement errors were calculated.

Введение

Актуальность исследований и разработки аппаратно-программного комплекса связана с развитием новых человеко-машинных интерфейсов, применяемых в различных сферах деятельности человека, в производственных, бытовых и медицинских приложениях. При выполнении ряда прецизионных операций медицинским, либо технологическим промышленным оборудованием требуется обеспечивать высокую точность позиционирования инструмента, тщательно согласовывая движение инструмента с визуальной информацией, в т.ч. виртуальной. Известны и продолжают совершенствоваться сенсорные робототехнические перчатки, позволяющие выполнять различные операции в системе виртуальной реальности. Одной из важных задач является восстановление моторики и двигательной активности человека с постинсультными и другими системными нарушениями. Особую сложность во время двигательной реабилитации вызывает большое

число степеней свободы механических движений человека и необходимость восстановления ряда биологических обратных связей для обеспечения подвижности и требуемой моторики.

Материалы и методы исследований

В рамках работы рассматриваются следующие задачи.

1. Разработка эскизного проекта трехмерной модели сенсорной перчатки.
2. Выбор сенсорного обеспечения роботизированной перчатки.
3. Оценка точности определения линейных и угловых координат с помощью магнитного метода.
4. Экспериментальное измерение точности системы.

Основной целью исследования является съем информации о механическом движении кисти руки человека и создание стендового макета кисти для оценки точности датчиков. Для определения пространственной ориентации кисти руки необходимо иметь данные о местной вертикали, которые можно получить с помощью трех одноосевых акселерометров. Смещение чувствительного элемента акселерометра дает информацию о «кажущемся» ускорении, т.е. о геометрической разности между действительным (истинным) ускорением основания объекта и гравитационным ускорением.

Создание трехмерной математической модели кисти руки человека проведено в нескольких системах проектирования – *Autodesk Inventor* [1] и *SolidWorks* [2]. Основной сложностью проектирования является наличие 23 степеней подвижности, имеющих в кисти руки человека. Общий облик системы с элементами дополнительного сенсорного обеспечения представлен на рисунке 1. В приведенной модели расположено 6 инерциальных модулей, оснащенных гироскопами, акселерометрами и магнитометрами, измеряющими углы поворота, ускорения и магнитную индукцию поля в проекциях на три ортогональные оси. Эти 5 инерциальных модулей закрепляются на кончиках каждого пальца, а последний инерциальный модуль крепится на верхней стороне ладони. На предплечье закрепляются электромагнит, создающий магнитное поле, и плата *Arduino UNO* [3], обеспечивающая сбор измерительной информации.

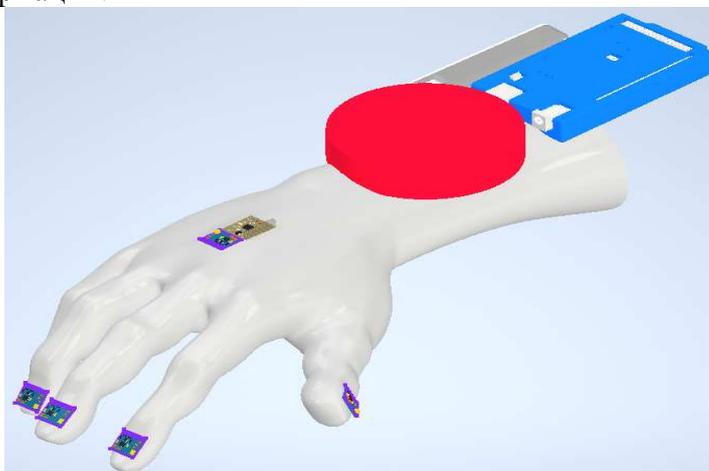


Рис. 1. Трехмерная модель кисти руки с дополнительным сенсорным обеспечением

Учитывая, что параметры математических моделей и уровень случайных погрешностей в измерениях могут быть оценены только по результатам стендовых испытаний с использованием специализированного оборудования, имеется возможность существенного улучшения точностных характеристик инерциального измерительного модуля.

Расчетная угловая скорость, заданная с помощью прецизионного поворотного стола, на котором установлен испытуемый инерциальный измерительный модуль, сравнивается с результатами измерений микромеханических гироскопов. Математическая модель погрешностей микромеханического гироскопа формируется с использованием асимптотических методов механики и теории эксперимента. Модель систематического и случайного дрейфа по каждому каналу инерциального измерительного модуля используется

для компенсации погрешностей в бортовом вычислителе. Для коррекции инерциальных измерительных данных будем использовать внешнюю измерительную информацию физической природы, отличной от инерциальной.

В составе системы управления электромеханической кисти руки предлагается включить датчики (тензометрические, энкодеры, магнитные, волоконно-оптические, микромеханические инерциальные гироскопы и акселерометры), обеспечивающие прецизионное измерение взаимного положения фаланг и кисти.

При описании движения фаланг кисти руки будем использовать кинематическую схему. Для описания кинематической модели будем использовать алгоритм Денавита–Хартенберга [4] и математические модели измерительных датчиков.

Готовая перчатка для считывания движений представлена на рисунке 2. Держатель пришивается к перчатке. В отверстия крепления на кончиках пальцев продевается бельевая резинка и сшивается, так чтобы было возможно надеть держатель на палец. Крышка приклеивается к держателю на ладони. На кончике пальца размещается трехосевой магнитометр в виде модуля GY-87 с размерами 21,8×17 миллиметров. Для данного модуля был разработан держатель. На внешней стороне ладони расположим модули GY-87 [5], TCA9548A [6] и электромагнит. Данная деталь пришивается на перчатку, в нее устанавливается TCA9548A, в отверстие прикручивается электромагнит. Деталь, закрывается крышкой, в которую устанавливаются датчики MPU6050 [7] и HMC5883L [8]. В меньшее отделение устанавливается HMC5883L, а в большее – MPU6050, соответственно.

Из-за сложности проведения отладки непосредственно на перчатке, было принято решение разработать отладочный стенд, который позволит тестировать систему и проводить отладку более простым образом. На кончике пальца и площадке, данного стенда, располагаются модули GY-87. Стенд оборудован креплением электромагнита. Палец можно выставлять в любое необходимое положение для тестирования системы. Готовый отладочный стенд изображен на рисунке 3.



Рис. 2. Перчатка для считывания движений

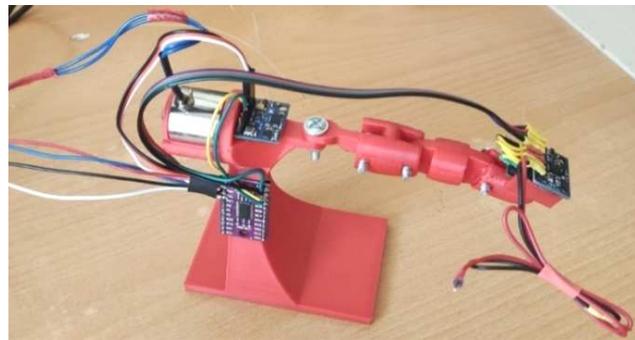


Рис. 3. Отладочный стенд

Рассмотрим соленоид в виде пластиковой катушки, на которую намотана тонкая проволока. Количество витков может быть различным, в зависимости от этого изменяются сопротивление и индуктивность полученного соленоида. Для повышения индуктивности в центральную полость катушки помещают ферритовый сердечник.

Зависимость магнитной индукции от протекающего тока в катушке тока описывается законом Био-Савара-Лапласа [9]

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} I \frac{[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3},$$

где $d\vec{B}$ – вектор магнитной индукции, создаваемый током I на отрезке $d\vec{l}$, расположенном на расстоянии \vec{r} от расчётной точки, μ и μ_0 – магнитная проницаемость среды и магнитная постоянная, соответственно.

Для соленоида можно воспользоваться известной формулой для расчёта поля на оси симметрии:

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{NI}{l} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2),$$

где N – количество витков в катушке, I – ток, l – длина катушки. Углы β_1, β_2 являются углами поворота вектора, направленного из точки измерения к краю катушки, относительно оси симметрии.

Расчёт вектора магнитной индукции по данной формуле не представляет затруднений, однако ограничен в использовании – расчётная точка должна находиться исключительно на оси симметрии соленоида. Для нахождения поля в произвольной точке желательно использовать формулу, не требующую расчёта интегралов.

Для расчёта напряжённости H магнитного поля диполя воспользуемся формулами [10]:

$$H_t = \frac{M}{4\pi\varrho^3} \sin \zeta; H_\varrho = \frac{M}{2\pi\varrho^3} \cos \zeta,$$

где H_ϱ и H_t – радиальная и тангенциальная составляющие вектора; M – модуль магнитного момента диполя; ϱ – расстояние от центра диполя до точки пространства, для которой рассчитываются компоненты напряженности; ζ – угол между магнитным моментом и радиус-вектором точки пространства, для которой рассчитываются компоненты напряженности. С учетом симметричности напряженности магнитного поля диполя относительно оси магнитного момента переменные ϱ и ζ являются сферическими координатами точки пространства, в которой вычисляется вектор напряженности.

Напряжённость и электромагнитная индукция связаны формулой

$$B = \mu\mu_0 H.$$

Векторное уравнение магнитного момента $\vec{M} = IS\vec{n}$, соответственно, модуль магнитного момента

$$M = IS,$$

где I – протекающий в рамке ток, S – площадь рамки.

Если витков несколько, то суммарный ток принимается равным произведению количества витков на ток, протекающий в каждом из них, тогда формула преобразуется к виду

$$M = NIS,$$

Тогда формулы для вычисления магнитной индукции поля примут следующий вид:

$$B_t = \mu\mu_0 \frac{NIS}{4\pi\varrho^3}; B_\varrho = \mu\mu_0 \frac{NIS}{2\pi\varrho^3} \cos \zeta.$$

В [10] указан ключевой недостаток данных формул – они справедливы только в том случае, когда расчётная точка находится на расстоянии, превышающем четыре радиуса диполя. Проверим справедливость этого утверждения, проведя расчёты в математическом пакете *Wolfram Mathematica* [11].

Для расчёта примем $N = 1000$, $I = 0,05$ А, $d = 0,01$ м, $l = 0,04$ м. Расстояние будем изменять в пределах от $2d$ до $2d + 0,5$ м. Результаты представлены в графическом виде на рисунке 4.

Как видно, полученные значения практически совпадают, а значит обе формулы можно использовать для дальнейших расчётов.

Для экспериментального определения магнитного поля были использованы следующие компоненты: электромагнит; магнитометр *HMC5883L* и линейка для измерения расстояния; лабораторный источник питания; плата *Arduino UNO*.

Для определения расстояния от электромагнита (катушки индуктивности) до магнитометра, расположенного случайным образом в магнитном поле, требуется знать его углы ориентации. Данные углы могут быть получены из блока инерциальной информации, в данном случае, с помощью датчика *MPU6050*, однако для первичной оценки достоверности полученных данных блок инерциальной измерительной информации допустимо не использовать.

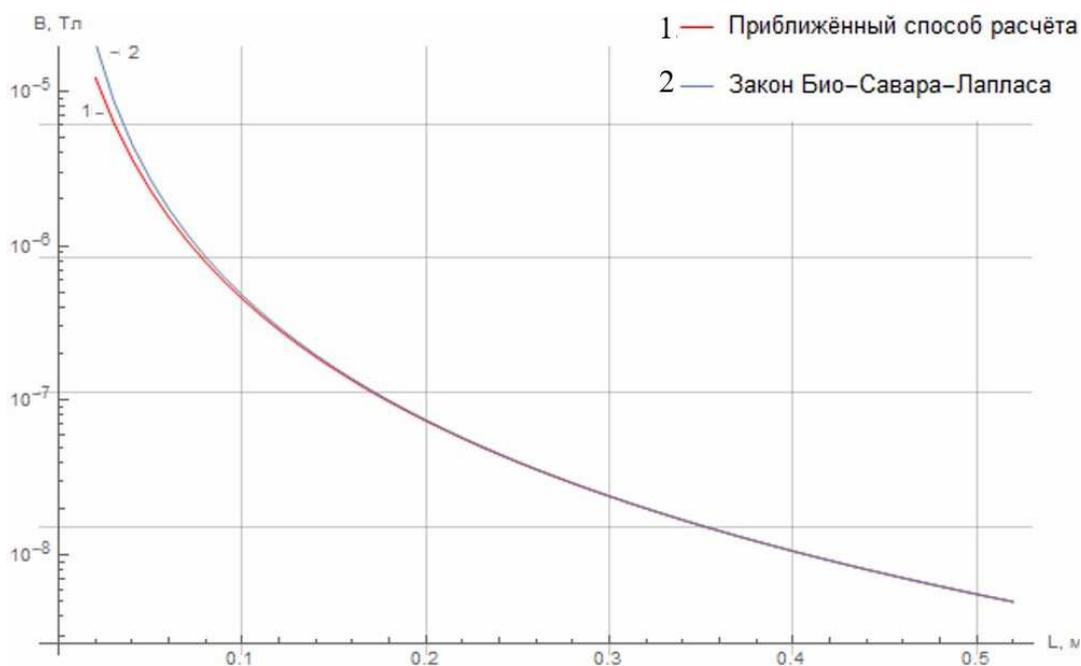


Рис. 4. Сравнительные графики магнитной индукции, вычисленной разными методами

Испытания разделим на следующие этапы:

- первичная оценка получаемых данных, когда магнитометр находится на расстоянии 50 мм, 100 мм, 150 мм, 200 мм;
- оценка случайной погрешности измерения расстояния, собственных шумов датчика;
- сравнение данных, полученных непосредственно с датчика, с данными, полученными после применения оптимальной по Гауссу фильтрации измерений;
- сравнение показаний, полученных при разном напряжении питания электромагнита: 5 В, 9 В, 12 В при расстоянии между магнитометров и электромагнитом равном 150 мм;
- оценка погрешности измерения расстояния при различном напряжении питания электромагнита;
- первичная оценка определения угла поворота и расстояния до датчика относительно оси электромагнита;
- оценка погрешности измерения угла поворота датчика.

Результаты проведённых испытаний приведены на рисунках 5, 6 и в таблицах 1-3.

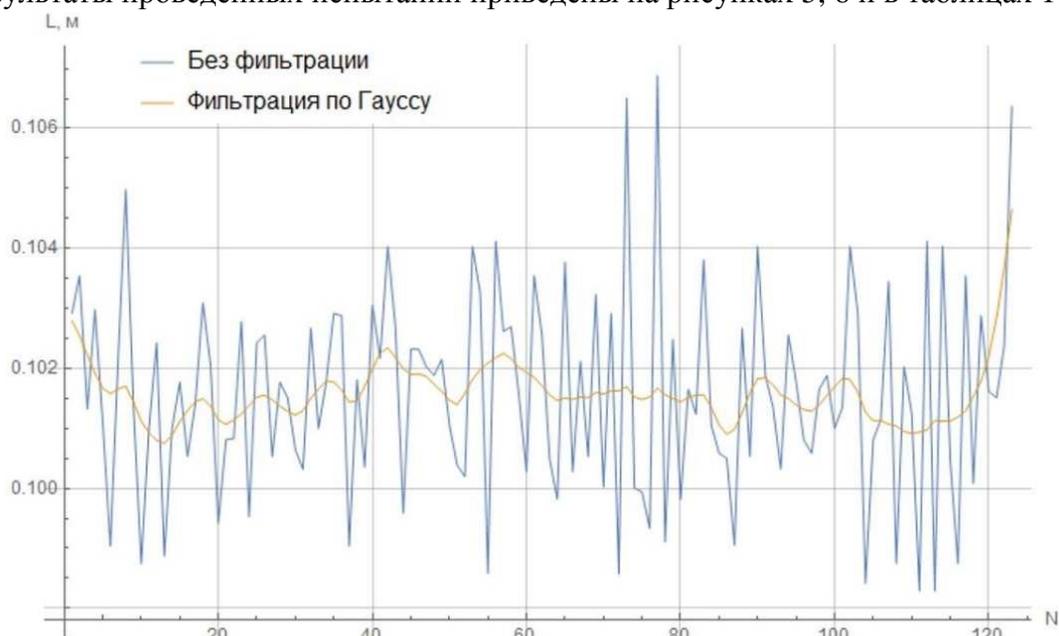


Рис. 5. Расстояние, измеренное магнитометром, при истинном значении расстояния равном 100 мм

Табл. 1. Измерение расстояния с помощью магнитометра, $U_{num} = 5 В$

$L_{факт}$, мм	50	100	150	200
Без фильтрации				
Среднее значение, мм	49,0369	101,5790	153,9900	200,7770
Среднеквадратичное отклонение, мм	0,09865	1,7220	9,5002	31,8756
Фильтрация по Гауссу				
Среднее значение, мм	49,0362	101,5910	153,9000	200,9980
Среднеквадратичное отклонение, мм	0,0236	0,51547	3,1049	10,3793

Табл. 2. Показания магнитометра при различном питающем напряжении

	Среднее значение, мм	Среднеквадратичное отклонение, мм
$U_{num} = 5В$		
Без фильтрации	152,4300	10,1288
Фильтрация по Гауссу	152,3012	3,2273
$U_{num} = 9В$		
Без фильтрации	153,0560	5,3735
Фильтрация по Гауссу	153,0623	1,5792
$U_{num} = 12В$		
Без фильтрации	154,8238	3,4057
Фильтрация по Гауссу	154,7704	0,9896

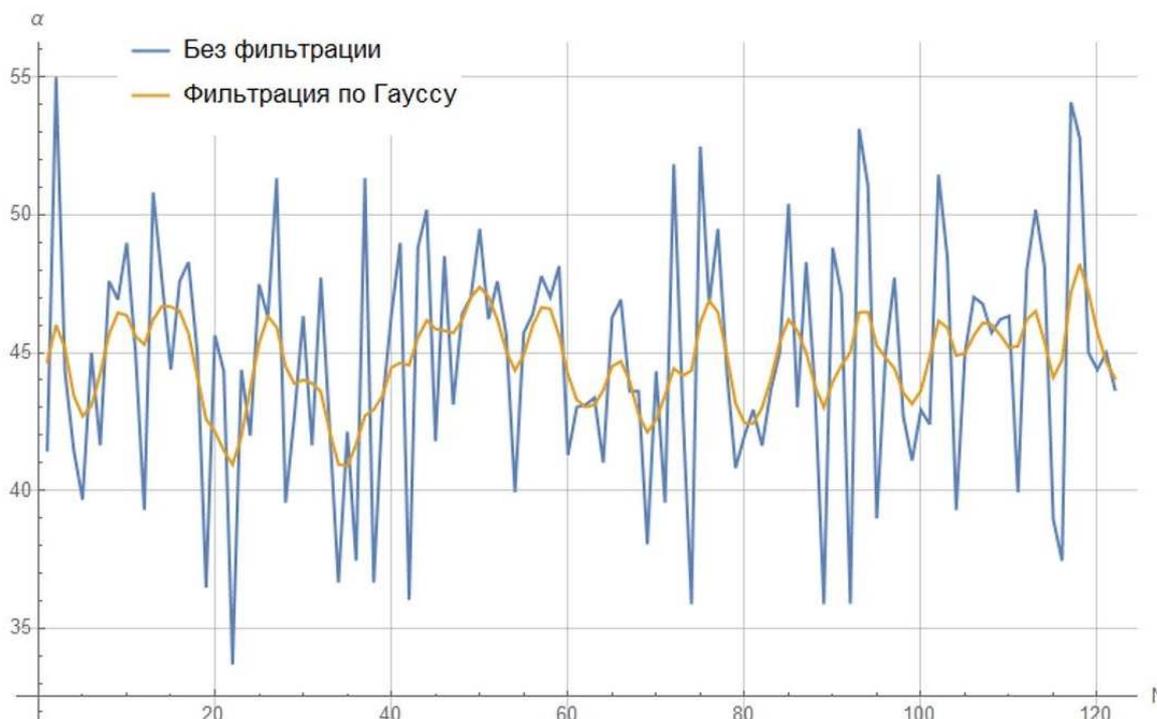


Рис. 6. Определение угла ориентации магнитометра, при истинном значении угла равном 45 градусов

Табл. 3. Определение погрешности измерения угла

Угол поворота, градусы	30	45	60	90
Без фильтрации				
Среднее значение, градусы	29,3135	44,7262	59,4242	90,8024
СКО, градусы	5,1460	4,3569	3,8324	2,8758
Фильтрация по Гауссу				
Среднее значение, градусы	29,3056	44,7085	59,4427	90,7865
СКО, градусы	1,9033	1,5516	1,3225	1,0859

Выводы. По результатам проведения испытаний можно сделать следующие выводы:

– представленные формулы для определения модуля вектора магнитной индукции справедливы и могут быть применены на практике для определения расстояния до магнитометра;

– с увеличением расстояния увеличивается случайная погрешность измерений, требуется обязательная фильтрация показаний датчика для достижения высокой точности;

– применение фильтрации по Гауссу позволяет в достаточной степени уменьшить погрешность;

– при увеличении питающего напряжения увеличивается ток в катушке и её нагрев, однако значительно растёт точность на большом расстоянии. Качественно оценить нагрев катушки не представляется возможным, ввиду отсутствия необходимого для термометрии оборудования. Необходимо отметить, что при нагреве снижается ток в катушке, что требуется учесть при расчётах. При повороте магнитометра относительно центра катушки сохраняется достаточная для оценки расстояния точность.

Заключение

По полученным результатам можно сказать, что алгоритм оценки расстояния до датчиков и углов поворота звена пальца, предложенный в работе, отвечает требуемой точности при соответствующей фильтрации помех. Также стоит заметить, что предложенный алгоритм позволяет определять положение в случае, когда расчетная точка находится на расстоянии больше, чем четыре радиуса катушки индуктивности.

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта «Разработка аппаратно-программного комплекса для дистанционного управления движением робототехнической системы» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2022-2024 гг.»

Список литературы

1. Пакет Autodesk Inventor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.autodesk.com>.
2. Пакет SolidWorks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.solidworks.com>.
3. Микроконтроллер Arduino UNO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>
4. Меркурьев И.В., Чунг Ч.Т., Сайпулаев Г.Р., Сайпулаев М.Р., Диб Д. Разработка модели кинематики пальцев человеческой руки, применяемых в роботизированных перчатках // Механика машин, механизмов и материалов. – 2023. – №4(65). – С. 106-113. – doi.org/10.46864/1995-0470-2023-4-65-106-113.
5. GY-87 modul [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.sunfounder.com/projects/elite-explorer-kit/en/latest/components/component_gy87.html.
6. Плата TCA9548A [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/463227/TI1/TCA9548APWR.html>.
7. Датчик MPU6050 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.sunfounder.com/projects/ultimate-sensor-kit/en/latest/components_basic/05-component_mpu6050.html.
8. Магнитометр HMC5883L [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ullisroboterseite.de/undsonstboards/HMC5883L.pdf>.
9. Коваленко И.И. Курс физики: учеб. пособие: в 6 ч. Ч. 3: Электричество и магнетизм. – СПб.: ГУАП, 2020. – 143 с.
10. Чернышов Е.С., Ен У.Ч. Магнитно-инерциальный метод определения относительного положения и ориентации объекта // Измерительная техника. – 2016. – №12. – С. 24-27.
11. Пакет Wolfram Mathematica [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wolfram.com/mathematica/>.

References

1. Autodesk Inventor [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.autodesk.com>.
2. SolidWorks [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.solidworks.com>.
3. Microcontroller [Electronic resource]. – Access mode: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>
4. Merkur'yev I.V., Chung Ch.T., Saypulaev G.R., Saypulaev M.R., Deeb D. Development of a model of kinematics of human hand fingers used in robotic gloves // Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials. 2023, no 4(65), pp. 106-113. doi.org/10.46864/1995-0470-2023-4-65-106-113.
5. GY-87 modul [Electronic resource]. – Access mode: https://docs.sunfounder.com/projects/elite-explorer-kit/en/latest/components/component_gy87.html.

6. TCA9548A [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/463227/TI1/TCA9548APWR.html>.
7. MPU6050 [Electronic resource]. – Access mode: https://docs.sunfounder.com/projects/ultimate-sensor-kit/en/latest/components_basic/05-component_mpu6050.html.
8. HMC5883L [Electronic resource]. – Access mode: <https://ullisroboterseite.de/undsonst-boards/HMC5883L.pdf>.
9. Kovalenko I. I. Kurs fiziki: ucheb. Manual: in 6 parts. Part 3: Electricity and Magnetism. – SPb.: SUAI Publ. 2020. – 143 p.
10. Chernyshov E.S., En U.Ch. Magnetic-Inertial Method for Determining the Relative Position and Orientation of an Object // Measuring technology. 2016, no. 12, pp. 24-27.
11. Wolfram Mathematica [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.wolfram.com/mathematica/>

Сведения об авторах:

Information about authors:

Чан Туан Чунг – аспирант	Chan Tuan Chung – postgraduate student
Меркурьев Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин	Merkuryev Igor Vladimirovich – doctor of technical science, professor, head of the Department of robotics, mechatronics, dynamics and machine strength
Сайпулаев Гасан Русланович – аспирант и старший преподаватель кафедры Робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин	Saypulaev Gasan Ruslanovich – postgraduate student and senior lecturer of Department of robotics, mechatronics, dynamics and machine strength
saypulaevgr@mail.ru	

Получена 26.04.2024