

УДК 621.865.8

**РАЗРАБОТКА РЫЧАГА-МАНИПУЛЯТОРА
ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ
АНТРОПОМОРФНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ****А.Е. Белявский, Н.С. Кудрявцева, А.В. Иванова,
А.Ю. Кикина, Д.П. Гайворонская**

Докт. техн. наук, доц. А.Е. Белявский; докт. техн. наук, проф. Н.С. Кудрявцева;
А.В. Иванова; Д.П. Гайворонская (МАИ)

Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации,
космонавт-испытатель отряда космонавтов ГК «Роскосмос» А.Ю. Кикина
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

Статья посвящена разработке рычага-манипулятора для исследования управления антропоморфным роботом. Устройство фиксирует движения оператора в экзоскелете и передает их исполнительному механизму. Конструкция включает карданный подвес с возвратными пружинами и датчики GY-521 (акселерометр/гироскоп) для точного измерения углов. Основные компоненты изготовлены 3D-печатью из PETG пластика. Система управления реализована на Arduino с обработкой в Matlab Simulink. Результаты позволяют повысить точность позиционирования робота за счет оптимизации алгоритмов управления.

Ключевые слова: антропоморфная робототехническая система, манипулятор, задающее устройство копирующего типа, аддитивные технологии, экспериментальное исследование

**Development of a Lever-Manipulator for Conducting an
Experimental Study of the Control Process of an Anthropomorphic
Robotic System. A.E. Belyavsky, N.S. Kudryavtseva, A.V. Ivanova,
A.Yu. Kikina, D.P. Gaivoronskaya**

The paper gives the development of a lever-manipulator to study the process of controlling an anthropomorphic robot. The device records the movements of an exoskeleton-suited operator and transmits them to the actuator. The design incorporates a gimbal suspension with return springs and GY-521 sensors (accelerometer/gyroscope) for precise angle measure. Key components are 3D-printed from PETG plastic. The control system is implemented on Arduino with data processing in Matlab Simulink. The results enable improved accuracy of robot positioning through optimized control algorithms.

Keywords: anthropomorphic robotic system, manipulator, copying-type setting device, additive technologies, experimental study

В настоящее время на базе лаборатории робототехники в ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» проводятся экспериментальные исследования по копированию движений оператора антропоморфной робототехнической системой

(АРТС) при помощи задающего устройства копирующего типа (ЗУКТ) [1]. ЗУКТ представляет собой экзоскелет, который надевается на оператора и позволяет управлять АРТС в реальном времени, при этом движения, совершаемые робототехнической системой, идентичны движениям оператора.

При работе бортовой АРТС в копирующем режиме управления и формировании управляющих сигналов ЗУКТ возникает рассогласование движений космонавта-оператора и АРТС [2, 5].

Цель проводимого экспериментального исследования заключается в сборе данных для построения аппроксимирующей зависимости между углом отклонения управляющего устройства (рычага-манипулятора), устанавливаемым рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и углом отклонения аналогичного управляющего устройства, получаемым в результате работы бортовой АРТС, а также в установлении аппроксимирующей зависимости между координатами точек, устанавливаемыми рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и координатами точек, устанавливаемыми рукой бортовой АРТС.

В качестве технического средства для проведения эксперимента используются два идентичных рычага-манипулятора, необходимых для точного отслеживания движений оператора и исполнительного органа АРТС. Данные, полученные с рычагов, позволяют получить информацию по рассогласованию движений космонавта-оператора и бортовой АРТС. Однако существующие в свободной продаже изделия либо слишком дороги, либо не обладают необходимыми характеристиками, такими как прочность и надежность, в то время как механические характеристики робототехнической системы и методология проведения эксперимента подразумевают повышенные нагрузки на оборудование. В связи с этим разработка собственной ручки-манипулятора становится актуальной задачей, требующей внимания и ресурсов.

Требования к конструкции

Функции, которые должен выполнять рычаг-манипулятор, зависят от конкретной области применения и типа проводимых экспериментов. Однако в общем случае устройство должно обеспечивать:

- точное позиционирование: устройство должно иметь возможность точно перемещаться в пространстве с минимальными отклонениями (люфтами);
- возвращение в исходное положение: рычаг-манипулятор должен автоматически возвращаться в исходное положение после снятия нагрузки. Это позволит оператору быстро переходить от одной задачи к другой без необходимости вручную возвращать устройство в начальную позицию;
- удобство использования: рычаг-манипулятор должен быть разработан с учетом эргономики и удобства использования, поскольку размеры экзоскелета (ЗУКТ) и размеры конечностей бортовой АРТС превышают размеры руки человека;

- прочностные характеристики: рычаг-манипулятор должен быть достаточно легким, но при этом прочным, чтобы выдерживать нагрузки, возникающие при выполнении этапов эксперимента;
- запись данных: устройство должно иметь возможность записи данных в ходе проведения эксперимента, таких как координаты перемещения, скорость, сила и т. д. Эти данные могут быть использованы для анализа результатов эксперимента, а также для настройки и калибровки устройства;
- низкая стоимость и ремонтпригодность: рычаг-манипулятор должен быть разработан таким образом, чтобы можно было легко заменить вышедшие из строя узлы в случае поломки.

Разработка конструкции

Рычаг-манипулятор представляет собой вертикальную ручку, способную отклоняться от исходного положения в двух плоскостях. Ручка крепится на карданном подвесе: каретка качается влево-вправо, а ручка на ней – вперед-назад. Качание ручки относительно каретки и каретки относительно основания фиксируется датчиком.

Для изготовления основных элементов устройства был выбран метод 3D-печати филаментом PETG. Использование 3D-печати для изготовления основных элементов рычага-манипулятора имеет ряд преимуществ: скорость и стоимость производства, гибкость дизайна, простота модификации и ремонтпригодность конечного изделия.

Также PETG пластик обладает высокой прочностью и способен выдерживать значительные нагрузки, что делает его идеальным материалом для компонентов, подвергающихся механическому воздействию [3].

Основание ручки-манипулятора выполнено из стальной пластины, что обеспечивает устройству необходимую прочность и устойчивость. Шарнирный узел рычага-манипулятора реализован с использованием карданного шарнира, который крепится к стальной пластине основания. На рис. 1 представлены изображения итоговой сборочной единицы рычага-манипулятора и 3D-прототип.

Ручка оснащена системой из шести пружин, которые обеспечивают автоматическое возвращение устройства в исходное положение после снятия нагрузки. Пружины расположены таким образом, чтобы создавать равномерное усилие во всех направлениях, что позволяет ручке плавно и точно вернуться в начальную позицию.

Сенсоры аналогичных устройств, как правило, выдают информационные коды со значением от нуля до максимума в зависимости от угла отклонения ручки: чем больше рукоять отклонена, тем больше цифровое значение кода. Диапазон цифрового значения кода ограничен ходом ручки и разрешением примененных сенсоров. После калибровки подобные манипуляторы можно применять для указания абсолютной позиции.



Рис. 1. Рычаг-манипулятор для проведения экспериментального исследования

Для определения положения рычага-манипулятора в пространстве использован акселерометр. Этот датчик позволяет измерять ускорение вдоль трех осей, что дает возможность точно определить угол поворота ручки относительно вертикальной оси вращения. Акселерометр обеспечивает высокую точность позиционирования и позволяет избежать использования сложных механических систем.

Основная микросхема – модуль GY-521 (MPU-6050), который содержит в себе акселерометр и гироскоп. Гироскоп используется для измерения угловых скоростей, а акселерометр – линейных ускорений. Совместное использование акселерометра и гироскопа позволяет полноценно определить движение тела в трехмерном пространстве [4].

Обработка данных осуществляется с помощью 16-битного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), размещенного на модуле GY-521. Связь с модулем производится посредством платы Arduino Nano V3, которая позволяет связать ПК с датчиком и записать полученные данные.

Для взаимодействия с Arduino используется шина I2C, датчик MPU-6050 всегда выступает в качестве подчиненного устройства. Подключив выводы SDA и SCL к соответствующим выводам на плате Arduino, можно считывать данные, а также выбирать необходимый диапазон измерений.

Если прибор размещен строго горизонтально и не движется, то проекции ускорения силы тяжести на оси X и Y равны нулю. Сила тяготения воспринимается только чувствительными элементами вертикальной оси Z.

Во время движения объект постоянно то ускоряется, то замедляется, это и позволяет использовать акселерометр не только для определения положения объекта, но и для определения динамических параметров при движении. Акселерометр регистрирует сумму ускорения при движении и гравитационные проекции ускорения на оси X, Y и Z, которые преобразуются в угол отклонения с точностью до 1° .

Разработка ПО

Для реализации программного обеспечения была выбрана среда MatLab Simulink, которая предоставляет мощные инструменты для моделирования и симуляции систем управления. Эта среда позволяет создавать графический интерфейс пользователя, который обеспечивает удобное взаимодействие с ручкой.

С помощью модели в MatLab Simulink можно управлять платой Arduino, которая служит мостом между компьютером и ручкой-манипулятором. Arduino принимает команды от компьютера и передает их на ручку, а также собирает данные о ее состоянии и передает их обратно на компьютер.

Модель в среде MatLab Simulink (рис. 2), разработанная для управления ручкой-манипулятором, принимает данные с акселерометра, подключенного к плате Arduino через шину I2C. Акселерометр измеряет проекции ускорения свободного падения вдоль трех осей, что позволяет определить угол поворота ручки относительно оси вращения.

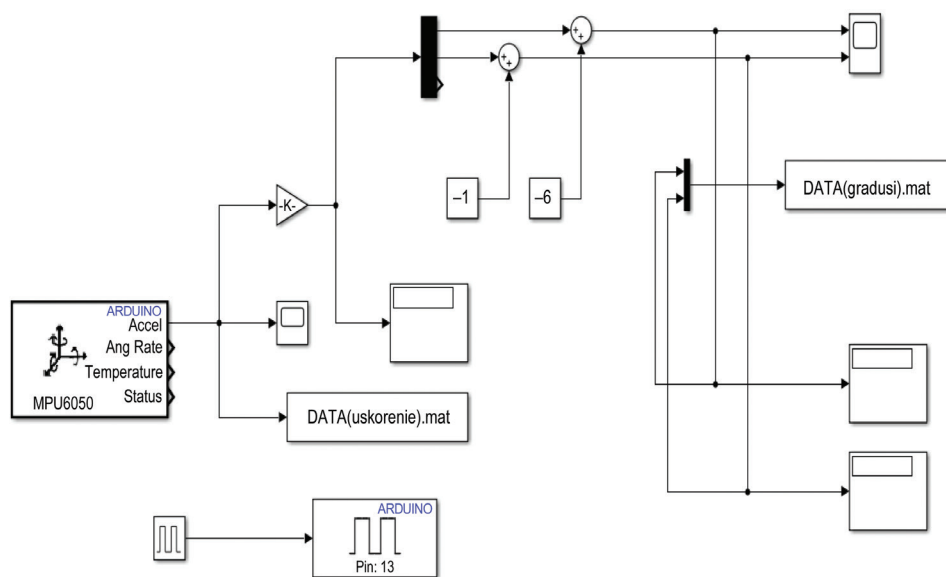


Рис. 2. Simulink-модель для проведения экспериментального исследования с помощью рычага-манипулятора

Полученные данные в виде проекций ускорения пересчитываются в градусы с помощью математических функций, встроенных в модель. Затем пересчитанные значения градусов записываются в файл для дальнейшего анализа и возможности воспроизведения эксперимента. Это позволяет исследователям анализировать результаты и сравнивать различные сценарии.

Выводы

В процессе разработки было проведено множество тестов для проверки работоспособности и надежности рычага-манипулятора. Итоговые точность позиционирования, скорость движения и другие ключевые параметры позволили создать эффективную и надежную оснастку, которая успешно справляется с поставленными задачами и удовлетворяет необходимым требованиям для проведения экспериментального исследования.

На основании результатов эксперимента методом линейной регрессии устанавливается аппроксимирующая зависимость между параметрами, задаваемыми рукой космонавта-оператора в ЗУКТ, и параметрами, получаемыми в результате работы руки бортовой АРТС. Далее с помощью полученных зависимостей происходит пересчет параметров, передаваемых через программный модуль на ПК оператора к бортовой АРТС.

Для дальнейшего повышения точности позиционирования исполнительных органов бортовой АРТС разработан расчетно-экспериментальный метод, состоящий из декомпозиции программы работы бортовой АРТС на базовые целевые операции. Для каждой базовой целевой операции разрабатывается отдельный алгоритм повышения точности и выявляются отдельные аппроксимирующие зависимости, которые будут внедрены в систему управления АРТС.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Фёдора» заменила «Марфа». – Текст: электронный // Центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина: [сайт]. – URL: <https://www.gctc.ru/main.php?id=6753> (дата обращения: 28.11.2024).
2. Дудоров, Е.А. Технологии системы управления антропоморфными робототехническими платформами // Известия вузов. Машиностроение. – 2023. – № 12(765). – С. 49–65.
3. Ильясова, А.В. Исследование современного рынка пластиков, используемых для 3D-печати / А.В. Ильясова, О.А. Белицкая // Сборник научных трудов по итогам Международной научно-практической заочной конференции. – Москва: Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, 2020. – С. 36–41.
4. Balancing System For A Zoomorphic Spot Type Mobile Robot Development Using An Accelerometer MPU 6050 (GY-521) / S. Maksymova [et al.] // 2024 IEEE 19th International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). – IEEE, 2024. – С. 39–42.
5. Разработка алгоритма повышения точности позиционирования углов поворота рычага управления бортовой антропоморфной робототехнической системой / А.Е. Белявский, А.Ю. Кикина, А.В. Федяев, А.В. Иванова // Пилотируемые полеты в космос. – 2025. – № 1(54). – С. 84–97.

REFERENCES

1. “Fyodor” Replaced by “Martha”. – Text: electronic // Gagarin Cosmonaut Training Center: [website]. – URL: <https://www.gctc.ru/main.php?id=6753> (date of access 11/28/2024).

2. Dudorov, E.A. Control System Technologies for Anthropomorphic Robotic Platforms. *Journal of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2023. – No 12(765). – P. 49–65.
3. Ilyasova, A.V. Research on the Modern Market of Plastics Used for 3D-Printing / A.V. Ilyasova, O.A. Belitskaya // *Proceedings of the International Scientific and Practical Correspondence Conference*. – Moscow: A.N. Kosygin Russian State University, 2020. – P. 36–41.
4. Balancing System For A Zoomorphic Spot Type Mobile Robot Development Using An Accelerometer MPU 6050 (GY-521) / S. Maksymova [et al.] // *2024 IEEE 19th International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*. – IEEE, 2024. – P. 39–42.
5. Development of an Algorithm for Increasing the Accuracy of Positioning the Rotation Angles of the Control Lever of the Onboard Anthropomorphous Robotic System / A.E. Belyavsky, A.Yu. Kikina, A.V. Fedyaev, A.V. Ivanova // *Manned Spaceflight*. – 2025. – No 1(54). – P. 84–97.