

Содержание

| | |
|--|-----------|
| LIST OF USED ABBREVIATIONS | 6 |
| SYMBOLS USED IN THE PAPER | 7 |
| ВВЕДЕНИЕ | 7 |
| 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ СИСТЕМЫ И ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ | 8 |
| 1.1. short | 8 |
| 1.2. Особенности мини роботов манипуляторов | 9 |
| 1.3. Общие требования к система управления робота манипулятора | 12 |
| 1.4. Система управления Gimbal в роли системы управления роботом | 12 |
| 1.5. Purpose and classification of robot arms | 13 |
| 1.6. Disadvantages of existing robotic arms | 14 |
| 1.7. Rationale for creating a miniature robotic manipulator | 14 |
| 1.8. Concept of systems development | 15 |
| 2 TECHNICAL PARAMETERS OF MINIROBOT | 16 |
| 2.1. Brief information about the robot arm | 16 |
| 2.2. Kinematic structure of the robot arm | 16 |
| 2.3. Industrial minirobot arm modes | 18 |
| 3 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МИНИ РОБОТА | 19 |
| 4 DEVELOPMENT OF FUNCTIONAL AND CIRCUIT DIAGRAMS OF THE MINIROBOT CONTROL SYSTEM | 20 |
| 5 DEVELOPMENT OF ALGORITHMS AND CONTROL PROGRAMMES FOR THE MINIROBOT CONTROL SYSTEM | 21 |
| REFERENCE LIST | 22 |

LIST OF USED ABBREVIATIONS

I2C – Inter-Integrated Circuit

PWM – Pulse-Width Modulation

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в области механики, электроники и цифровых устройств, привел к созданию инновационных устройств. Это в свою очередь поспособствовало прогрессу, существенному повышению качества и возможностей ранее разработанных решений. Одним из примеров недавних разработок можно считать устройства группы gimbal. Устройство группы Gimbal и представляет собой сложную систему взаимодействия электродвигателей, электроники и датчиков для обеспечения плавности и стабилизации камер. Главной особенностью является использование бесколлекторных электрических двигателей постоянного тока. BLDC моторы обладают высокой эффективностью и мощностью при небольшом весе.

В настоящее время роботы манипуляторы являются главным элементом процесса автоматизации производств. Обуславливается это гибкостью, точностью, скоростью и способностью выполнять поставленные задачи. Однако не во всех сферах роботы заменили ручной труд. Большинство работ связанных со сборкой деталей небольших размеров выполняются людьми. Для выполнения задач такого рода использование существующих универсальных промышленных роботов является не эффективным и не рациональным решением, виду их большого размера и параметров несоответствующих для работы с мелкими деталями и конструкциями.

Данная работа посвящена разработке системы управления для мини робота на основе двигателей от Gimbal. Актуальность разработки таких систем управления повышается в связи с тенденциями в необходимости разработок мини роботов и использование мини роботов в ближайшие годы.

Работа содержит 5 разделов. В первом разделе производится анализ устройств gimbal, мини роботов манипуляторов, которые доступны на рынке и их характеристики. Исследуются варианты управления двигателями gimbal и производится разработка функций и технических параметров для системы управления мини роботом. Во втором разделе производится разработка структурной схемы на основе иерархической парадигмы управления роботом, а также алгоритма её описания для системы управления мини роботом. В третьем разделе производится разработка функциональной схемы и описание и назначения ее элементов. В четвертом разделе производится разработка принципиальной схемы с ее описанием, расчет элементов схемы. В пятой части производится разработка алгоритмов и программная реализация на микроконтроллере.

1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ СИСТЕМЫ И ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ

1.1. Электрические машины от Gimbal

Прогресс в области механики, электроники и цифровых устройств, привел к созданию инновационных устройств. Это в свою очередь поспособствовало прогрессу, существенному повышению качества и возможностей ранее разработанных решений. Одним из примеров недавних разработок можно считать устройства группы gimbal[ссылка]. Устройство группы Gimbal изображенно на картинке 1.1 и представляет собой сложную систему взаимодействия электродвигателей, электроники и датчиков для обеспечения плавности и стабилизации камер. В большинстве случаев данные устройства используются людьми, поэтому уделяются особое внимание компактности и малому весу.



Рис. 1.1. Устройство Gimbal

Главной особенностью является использование бесколлекторных электрических двигателей постоянного тока, известные также как BLDC (Brushless DC) моторы. BLDC моторы обладают высокой эффективностью и мощностью при небольшом весе. К примеру, стабилизатор камер «RONIN» от компании «DJI», можно считать популярными и доступным товаром на рынке. В его спецификации производитель заявляет максимальный вес до 7.25кг, при весе устройства (без груза) 4.2 кг, то есть нагрузка превышает почти в более чем два собственный вес устройства (Ronin 2023).

Данный пример не исключение, производители предлагают обширное количество моде-

лей подобных устройств с различными характеристиками. Из-за высокого спроса на устройства данной категории, производители начали выпускать BLDC двигатели с оптимизированными параметрами электронных стабилизаторов. В интернете и литературе начали использовать термин Gimbal motors (Lee et al. 2018), то есть двигатели с конкретными характеристиками и под конкретные задачи.

Существует интерес к разработкам различных типов BLDC моторов и возможности их использования при разработке робототехнических систем и устройств. Поэтому становится актуальной задачей построение систем управления Gimbal для выполнения робототехнических операций.

1.2. Особенности мини роботов манипуляторов

В настоящее время роботы манипуляторы являются главным элементом процесса автоматизации производств. Обуславливается это гибкостью, точностью, скоростью и способностью выполнять поставленные задачи. Роботы способны работать автономно круглосуточно, что способствует повышению количества производимых товаров. Роботы все больше используются для выполнения опасных, вредных и монотонных задач, облегчая условия труда для человека. Однако не во всех сферах роботы заменили ручной труд. Большинство работ связанных со сборкой деталей небольших размеров выполняются людьми. Для выполнения задач такого рода использование существующих универсальных промышленных роботов является не эффективным и не рациональным решением, виду их большого размера и параметров несоответствующих для работы с мелкими деталями и конструкциями.

Целесообразно использовать для задач подбора и размещения, сборки, дозирования, тестирования и контроля мелких деталей роботов меньших габаритов то есть мини роботов. Мини роботы манипуляторы существуют и разработки ведутся в данном направлении (Li et al. 2022), примером таких роботов могут считаться роботы моделей «MotoMini» от компании «Yaskawa», «Meca500» (Рисунок 1.1) от компании «Mecademic» и другие. Тема мини роботов не является новой, однако стоит отметить, количество информации, на данный момент, о роботах этого класса крайне не большое. В случае использования данных роботов в промышленном производстве в области работ с мелкими деталями, большинство задач требующих ручного труда человека, будут автоматизированы (робототизированны).



Рис. 1.2. Meca500 Robot Arm

На данный момент лидером в сфере промышленного производства является Китай, на промышленность которого приходится 32% ВВП (? , statistaChinaComposition) Именно в Китае массовое производство является очень развитым. Главным фактором, обуславливающим это можно назвать то, что в КНР крайне дешевая рабочая сила (Рисунок 1.3).



Рис. 1.3. Процесс работы людей в Китае в сфере производства

Однако, за этим притягательным для многих, в том числе европейских, компаний фактором часто скрываются негуманные условия работы, детский труд и необеспечение безопасной рабочей среды. В свою очередь развитие мини роботов не только создаст почву для открытия промышленных производств в Евро Союзе, что в свою очередь уменьшит затраты на транспортировку и освободит от многих налогов, но и поможет предотвратить использование «грязной» рабочей силы.

Экономическая выгода для бизнеса от применения мини роботов большая, так как мини роботы способны заменить значимую часть человеческого ручного труда. Это в свою очередь создает благополучную почву для увеличения количества производимого товара, исключает большую часть возможных производственных ошибок, вызванных человеческим фактором.

Замена рабочей силы может стать фактором для увеличения чистой прибыли компаний даже в Латвии, так как исключается необходимость в выплате обязательных взносов на национальное социальное страхование (MSSIC) размер которой составляет от 23,59 до 34,09 процентов ежемесячно. Соответственно при уменьшении количества работников компания получит более высокий доход, ведь не будет необходимости платить суммарный налог MSSIC (Vid 2023).

Дальнейшее развитие мини роботов возможно только путем улучшения их технических характеристик. При возможности использования компонентов малых размеров с требуемыми параметрами. Важным компонентом механизма мини робота манипулятора является электродвигатель. В поисках лучшего решения разрабатывают с различными вариантами двигателей. Исходя из тенденций последних исследований (Sakama et al. 2022) рис 1.4 видно, что удельная мощность бесщеточных двигателей постоянного тока, с 1990-х годов, увеличилась более чем в десять раз за 20 лет, и теперь бесщеточные двигатели постоянного тока являются электродвигателями с самой высокой удельной мощностью. Удельная мощность данных двигателей увеличилась после появления постоянных магнитов с высокой максимальной энергией. В частности, появление неодимового магнита.

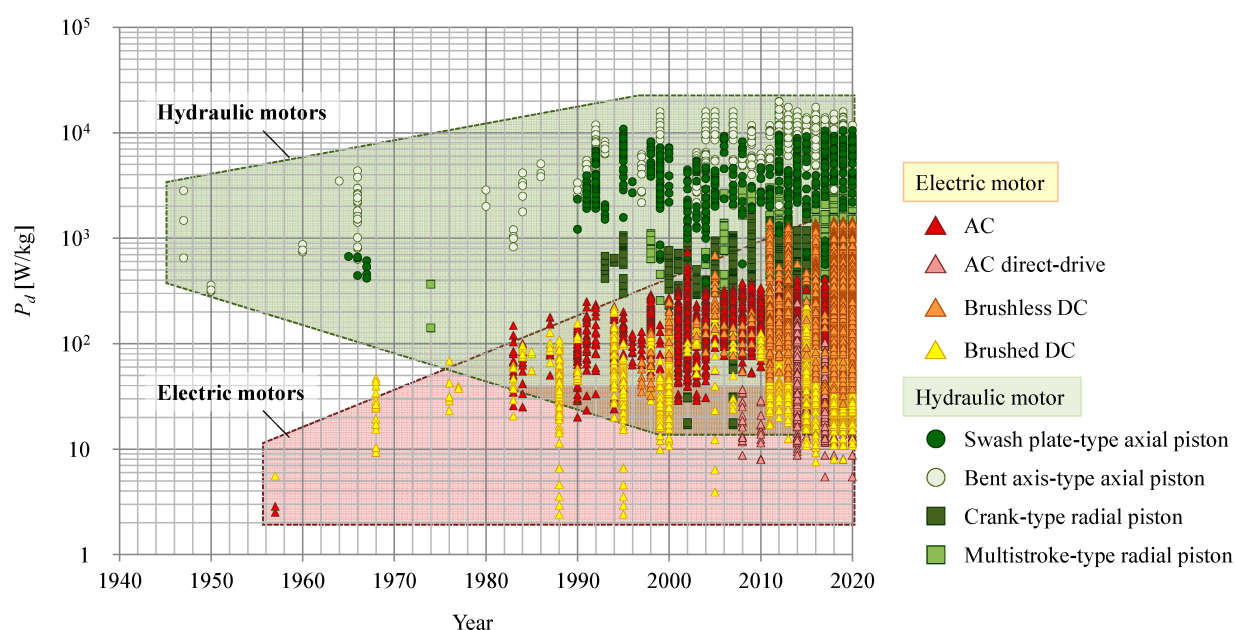


Рис. 1.4. Измерение удельной мощности в электрических двигателях во времени (Sakama et al. 2022)

1.3. Общие требования к система управления робота манипулятора

Любой робот-манипулятор состоит из различных систем: электронной, механической, вычислительной, сенсорной и других. Система управления робота должна организовывать работу между ними и обеспечить функционирование робота манипулятора по следующим требованиям:

- Точное управление движением, плавное управление движениями робота с большой точностью, включая синхронизацию всех суставов и механизмов;
- Реализация заданных алгоритмов и задач, включает в себя задачи последовательности движений и операций действий робота;
- Обработка сенсорных данных, точно обрабатывать данные с датчиков для адаптации к изменениям окружающей среды;
- Взаимодействие с оператором, возможности для ручного управления и программирования;
- Интеграция с другими системами, робот являться не только одним элементом на производстве, использование совместно с системами конвейерных линий.

1.4. Система управления Gimbal в роли системы управления роботом

После тщательного изучения требований, которым должен соответствовать робот манипулятор. Возникает логичный вопрос: почему не использовать готовые наработки для стабилизации камер в робототехнике? Сравнительном анализ двух систем показывает методы и принципы управления в общем совпадают. Однако, более детальный анализ выявляет как потенциальные возможности, так и ограничения данного решения. Системы стабилизации камер, как и роботы-манипуляторы используют сложные алгоритмы для контроля положения и движения, но в случаях устройств Gimbal управление можно представить как величин питающего напряжения и частоты с использованием скалярных регуляторов. (Altan & Hacıoğlu 2020) В то же время области применения двух систем диаметрально отличаются друг от друга: в системах управлениях Gimbal не применяются датчики угла поворота оси двигателя, а информацию о значении текущего положения рассчитывается с использованием значений гироскопа и акселерометра. Значений этих датчиков достаточно для обеспечения стабилизации, но не достаточно для определения точного положения управляемого объекта в пространстве, причина тому наличие дрейфа получаемых данных (Akçayir & Ozkazanc 2003). Можно использовать алгоритмы

фильтрации данных для уменьшения погрешностей управления, но это усложняет систему управления. Привлекательно является применение более простых и надёжных решения управления.

Если нет возможности использования систему управления от Gimbal по ряду причин, указанных выше, то тогда целесообразно разработать систему управления роботом на основе двигателей Gimbal Motors учитывая их достоинства (значительная мощность при маленьких габаритах) в системах стабилизации камер, а при учитывании актуальности использования мини роботов в целом. Актуальность разработки таких систем управления повышается в связи с тенденциями в необходимости разработок мини роботов и использование мини роботов в ближайшие годы.

Эта актуальность определила целью работы. Целью работы является разработка системы управления мини роботом манипулятором на основе Gimbal motors.

1.5. Purpose and classification of robot arms

Industrial robots, and in particular manipulating robots, have a wide range of applications in a variety of sectors and offer many advantages, including increased productivity, accuracy and safety. Certain types of robots may be better suited to a particular application than others.

- Welding
- Material Handling
- Assembly
- Painting and Coating
- Packaging
- Inspection and Quality Control
- Machine Tending



Рис. 1.5. Industrial robot arm

One of the main characteristics of any robot arm is the number of degrees of freedom (DoF), which is characterised by the set of motion axis parameters that the robot has. It describes the freedom of movement of the robot arm or manipulator in its workspace. The degrees of freedom of a robot arm are determined by the number of joints it has, each of which provides a specific axis of motion.

The degrees of freedom of the robot arm can be classified in one of two possible ways:

- Linear Motion (Translational DoF)
- Rotational Motion (Rotational DoF)

Manipulator robots can be classified on the basis of their structure and movement capabilities. Each type is suitable for each application, rotating joints and often the preferred choice for tasks that involve reaching, grasping and positioning objects, as they allow for more flexible movement in a variety of directions. In scenarios where precise linear motion is required, such as assembly lines where components need to be moved in a straight line, prismatic couplings can be used. But it is not uncommon to use two types of motion in a robot design and they have become widespread.

There is no strict dependency on which type of robot arm should be used in a particular case. The choice of robot arm will still get the job done, but the right robot is necessary to maximise productivity and cost savings.

1.6. Disadvantages of existing robotic arms

1.7. Rationale for creating a miniature robotic manipulator

Nowadays the use of mini robot manipulators in modern production is rare and most of any small works are created manually or it is necessary to create machines for a specific task, which takes more

time to develop on a more universal basis. And the use of human resources is a human factor and quality is reduced in pursuit of quantity.

The problem can be solved by creating a new robot manipulator that will be suitable for interaction with small objects, as well as more cost-effective in the process of exploitation.

1.8. Concept of systems development

This bachelor thesis will deal with the creation of a control system for a mini robot. The control system will include algorithms and control board, motor control board for the robot's axes. The principle is to create a modular design of the control system, which allows to increase or remove the motor boards, without any special modification of the robot itself.

2 TECHNICAL PARAMETERS OF MINIROBOT

2.1. Brief information about the robot arm

This chapter will provide a short description of the development of the minirobot control system.

The comparative characteristics of existing robot types are shown in the table 2.1.

Таблица 2.1

Various types of robots and their characteristics

| | Speed | Accuracy | DoF |
|-----------|-------------|-------------|-----------------|
| Robot Arm | Low | Middle | High (6) |
| Scara | Middle | High | Middle (4) |
| Delta | High | Low | Middle (4) |

For the implementation of the robot control system was chosen "Robot Arm" type because of the high degree of mobility of this type of robot, which contribute to a more convenient movement of objects in space.

2.2. Kinematic structure of the robot arm

The design of a robot manipulator can usually be divided into many parts. It is divided into several structural elements that perform different functions and movements: the base, the body, the mechanical arm, the gripper. The latter, depending on the production requirements, is performed by: a gripper, when something needs to be moved, held or assembled; a welder - directly for welding products; a suction tool - to hold or move an object. From the base to the gripper, the robot is made up of links forming a kinematic chain. Two adjacent links form a kinematic pair. The distance from one link to another is called the link length. The distance from one degree of freedom to another is called the link distance.

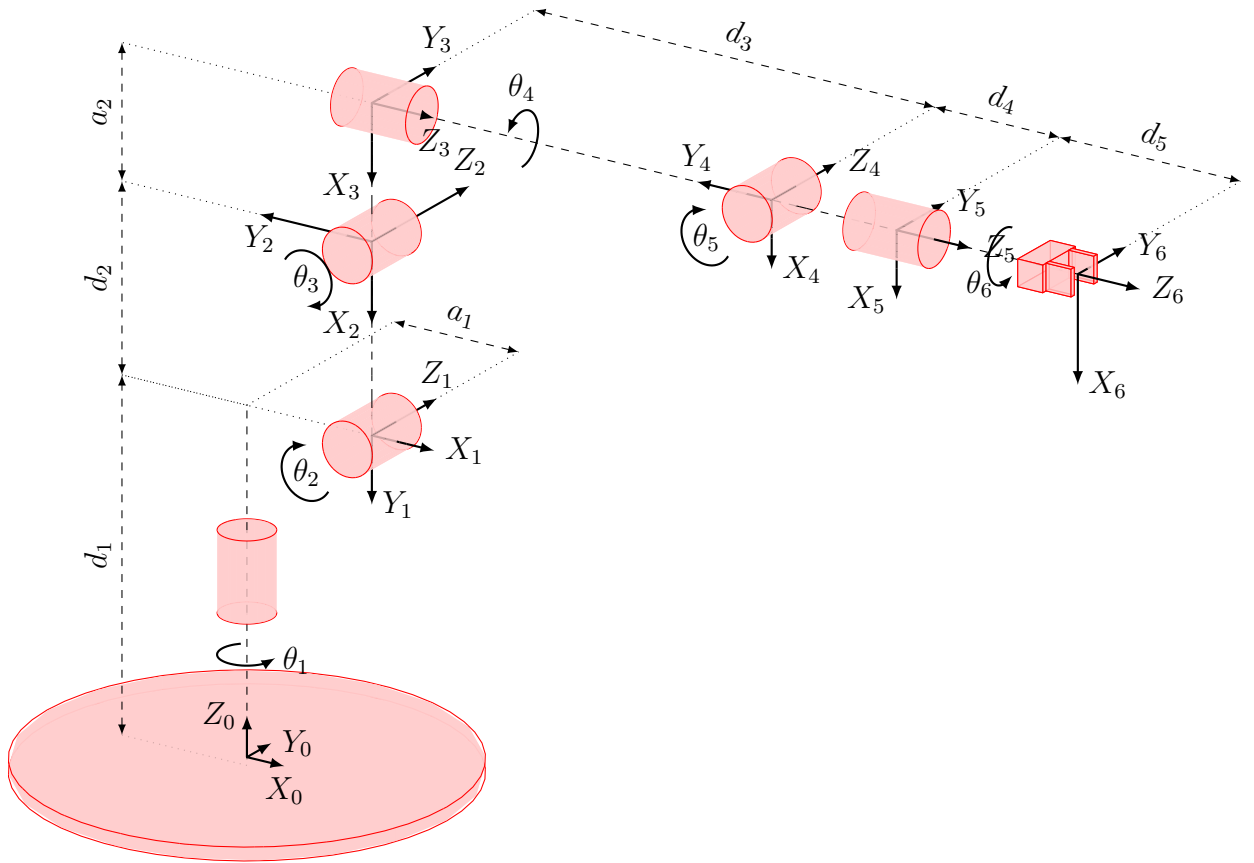


Рис. 2.1. Kinematic structure of robot manipulator

Kinematic diagram of the manipulator robot presented in figure 2.1

d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 - Link distances

$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ - Link angles

a_1, a_2 - Link lengths

X_0, Y_0, Z_0 - Base coordinates

X_6, Y_6, Z_6 - Tool coordinates

Таблица 2.2

Denavit Hartenberg table of kinematic parameters of the robot

| Joints | θ_i | d_i | a_i | α_i |
|--------|-----------------|-------|--------|------------|
| 1 | θ_1 | d_1 | a_1 | -90 |
| 2 | $\theta_2 + 90$ | 0 | $-d_2$ | 0 |
| 3 | θ_3 | 0 | $-a_2$ | 90 |
| 4 | θ_4 | d_3 | 0 | -90 |
| 5 | θ_5 | d_4 | 0 | 90 |
| 6 | θ_6 | d_5 | 0 | 0 |

On the basis of the design proposal, Table 1 shows the DH pa parameters of the robot arm. Using

| Column1 | a + b | a - b | a * b | a / b | sin(a) | log(a) | sqrt(b) | pow(b, a) |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|-----------|
| ATmega328p | 8,990 | 8,674 | 9,998 | 31,011 | 104,511 | 155,074 | 30,989 | 328,667 |
| ESP32 | 0,090 | 0,077 | 0,087 | 0,255 | 0,486 | 1,045 | 0,379 | 2,808 |
| ESP8266 | 0,434 | 0,451 | 0,706 | 1,787 | 12,885 | 26,103 | 7,946 | 76,300 |
| RP2040 [Arduino IDE] | 0,962 | 1,041 | 1,370 | 3,719 | 16,537 | 27,497 | 3,575 | 61,730 |
| RP2040 [C++ SDK] | 0,742 | 0,775 | 0,642 | 0,811 | 4,626 | 6,602 | 0,701 | 17,280 |
| RP2040 [MicroPython] | 11,956 | 10,631 | 10,402 | 11,043 | 17,035 | 18,798 | 13,232 | 34,994 |
| STM32G431 | 0,058 | 0,060 | 0,051 | 0,135 | 0,444 | 0,952 | 0,131 | 5,261 |
| STM32G431 [FPU-OFF] | 0,501 | 0,521 | 0,343 | 1,210 | 5,407 | 12,387 | 2,559 | 42,766 |

the parameters from Table 1, the following forward kinematic equation for the determination of the transformation matrix of the robot arm can be of the connecting rod:

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & -\sin(\theta_1) & a_1 \cos(\theta) \\ \sin(\theta_1) & 0 & \cos(\theta_1) & a_1 \sin(\theta) \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.3. Industrial minirobot arm modes

3 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МИНИ РОБОТА

4 DEVELOPMENT OF FUNCTIONAL AND CIRCUIT DIAGRAMS OF THE MINIROBOT CONTROL SYSTEM

5 DEVELOPMENT OF ALGORITHMS AND CONTROL PROGRAMMES FOR THE MINIROBOT CONTROL SYSTEM

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akcayir, Y. & Ozkazanc, Y. (2003), Gyroscope drift estimation analysis in land navigation systems, in 'Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, 2003. CCA 2003.', Vol. 2, pp. 1488–1491 vol.2.
2. Altan, A. & Hacıoğlu, R. (2020), 'Model predictive control of three-axis gimbal system mounted on uav for real-time target tracking under external disturbances', *Mechanical Systems and Signal Processing* **138**, 106548.
URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106548>
3. Lee, J.-K., Jung, D.-H., Kim, H.-W., Park, Y., Min, Y. G., Ko, K.-C., Kim, S., Park, W. & Lee, J. (2018), A study on design of torque motor for drone gimbal system, in '2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)', IEEE.
URL: <http://dx.doi.org/10.23919/ICEMS.2018.8549483>
4. Li, J., Guan, Y., Chen, H., Wang, B., Zhang, T., Hong, J. & Wang, D. (2022), 'Real-time normal contact force control for robotic surface processing of workpieces without a priori geometric model', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **119**(3–4), 2537–2551.
URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-021-07497-2>
5. Ronin (2023), "ronin specs".
URL: <https://www.dji.com/lv/ronin/info>
6. Sakama, S., Tanaka, Y. & Kamimura, A. (2022), 'Characteristics of hydraulic and electric servo motors', *Actuators* **11**(1), 11.
URL: <http://dx.doi.org/10.3390/act11010011>
7. Vid (2023), 'Mandatory State Social Insurance Contributions — vid.gov.lv'.
URL: <https://www.vid.gov.lv/en/mandatory-state-social-insurance-contributions/>