

Динамические модели управления и стабилизации движения манипулятора беспилотного летательного аппарата

В.В. Нгуен¹ ✉, Е.Е. Усина²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская 67, лит. А, г. Санкт-Петербург 190000, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук 14 линия В.О., 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: vinhnguyen.tccnqp@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Повышение точности наведения робототехнического захвата, установленного на беспилотном летательном аппарате, и стабильности всей комбинированной воздушной манипуляционной системы является основной целью данного исследования. Для достижения указанной цели была решена частная задача разработки системы управления манипулятора, которая учитывает совместное рабочее пространство манипулятора и беспилотного летательного аппарата.

Методы. В данной работе предложена кинематическая модель манипулятора с тремя степенями свободы, которая является частью воздушной манипуляционной системы квадрантора. Поворотное движение двух последовательных звеньев выполняется с помощью шарнирного соединения. Для данного манипулятора были решены прямая и обратная задача кинематики, а также получены уравнения для динамической модели. Динамический отклик каждого звена достаточен для быстрой стабилизации системы с небольшим перерегулированием. На основе этих данных для управления манипулятором был разработан самонастраивающийся нечеткий пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор. Система управления для каждого звена манипулятора состоит из ПИД-регулятора и нечеткого ПИД-вывода с использованием метода Мамдани.

Результаты. Было проведено моделирование разработанной системы управления манипулятором при отсутствии возмущений. Показано, что предложенная система управления удовлетворяет заданным требованиям и обеспечивает непрерывное и плавное перемещение звеньев манипулятора по рассчитанной траектории.

Заключение. Разработанный метод управления движением трехзвенного манипулятора обеспечивает горизонтальный сдвиг центра масс не более 1,25 мм, что является приемлемым результатом для быстрой стабилизации беспилотным летательным манипулятором и проведения дальнейших практических экспериментов.

Ключевые слова: беспилотный летательный манипулятор; воздушная манипуляционная система; манипулятор; робототехника; нечеткий ПИД-регулятор; центр масс; БЛА.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Нгуен В.В., Усина Е.Е. Динамические модели управления и стабилизации движения манипулятора беспилотного летательного аппарата // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 200-216. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-200-216>.

Поступила в редакцию 21.09.2020

Подписана в печать 14.10.2020

Опубликована 30.12.2020

© Нгуен В.В., Усина Е.Е., 2020

Dynamic Models of Unmanned Aerial Vehicle Manipulator Control and Stabilization

Van V. Nguyen¹ ✉, Elizaveta E. Usina²

¹ Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI)
67, Bolshaya Morskaya str., St. Petersburg 190000, Russian Federation

² St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
39, 14th Line, St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: vinhnguyen.tccnqp@gmail.com

Abstract

Purpose or research. Improving guidance accuracy of robotic capture mounted on an unmanned aerial vehicle and the stability of combined aerial manipulation system is the main objective of this study. In order to achieve this goal, a particular task of developing a manipulator control system that considers joint working space of manipulator and unmanned aerial vehicle has been solved.

Methods. Kinematic model of a manipulator with three degrees of freedom is proposed in this work. This is a part of air manipulation system of quadrotor. Rotary movement of two successive links is performed by means of hinge joint. Direct and inverse kinematic tasks were solved for this manipulator. Equations for dynamic model were also obtained. Dynamic response of each link is sufficient for quick stabilization of the system with little re-adjustment. Self-tuning fuzzy proportional-integral-differentiating (PID) regulator was developed based on these data to control the manipulator. Control system for each manipulator link consists of a PID regulator and a fuzzy PID output using Mamdani method.

Results. Simulation of developed manipulator control system was carried out in the absence of disturbances. The proposed control system satisfies specified requirements and ensures continuous and smooth movement of manipulator links in calculated trajectory.

Conclusion. The developed three-link manipulator motion control method provides a horizontal mass center shift not more than 1.25 mm, which is an acceptable result for rapid stabilization of unmanned aerial manipulator and further practical experiments.

Keywords: unmanned aerial manipulator; air manipulation system; manipulator; robotics; fuzzy PID regulator; center of mass; UAV.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Nguyen V. V., Usina E. E. Dynamic Models of Unmanned Aerial Vehicle Manipulator Control and Stabilization. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 200-216 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-200-216>.

Received 21.09.2020

Accepted 14.10.2020

Published 30.12.2020

Введение

Современные беспилотные летательные аппараты (БЛА) оснащены вы-

сокоёмкими аккумуляторами, за счет чего обладают большей грузоподъем-

ностью. Это позволяет устанавливать на БЛА различные механизмы, например, манипуляторы для выполнения задач физического взаимодействия с объектами окружающей среды [1]. Комбинированная система, объединяющая БЛА и манипулятор, в литературе часто называется беспилотным летательным манипулятором (БЛМ) или воздушной манипуляционной системой [2, 3, 4]. БЛМ представляет собой сложную систему, состоящую из БЛА и манипулятора с рабочим концевым механизмом. Поскольку для выполнения данных задач необходимым условием является возможность точного позиционирования БЛА в воздушном пространстве, то в таком случае в качестве БЛА используются мультироторы, которые способны двигаться в любом направлении при различных скоростях, а также зависать над объектами в отличие от прочих моделей летательных аппаратов [5].

Большинство существующих конструкторских решений манипуляционных систем БЛА представляют собой манипулятор с несколькими степенями свободы, на конце которого установлены один или несколько различных захватных механизмов, позволяющих удерживать предметы разнообразных форм [6-10]. Рассмотрим некоторые существующие системы управления БЛМ. Так, например, в работе [11] БЛМ состоит из двухзвенного манипулятора, прикрепленного к нижней части квадрантора, способного нести массивную полезную нагрузку. Контроллер системы управ-

ления был разработан на основе надежного внутреннего контура компенсации (Robust Internal-loop Compensator) и по результатам моделирования управления доказал свою эффективность перед регулятором с нечеткой логики (РНЛ) по следующим параметрам: высокая скорость вычислений и возможность подавления помех.

В работе [12] тестирование различных регуляторов для робота-манипулятора с 3 степенями свободы показало, что пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор и пропорционально-дифференцирующий (ПД) регулятор работают лучше, чем РНЛ, с точки зрения времени нарастания и времени установления, в то время как РНЛ показывает меньшее время перерегулирования.

В работе [13] для управления манипулятором с 2 степенями свободы был использован нечеткий самонастраивающийся ПИД-регулятор. По сравнению с традиционным ПИД-регулятором, данный регулятор превосходит его по следующим параметрам: меньшее время отклика, небольшое перерегулирование и высокая стабилизация, хорошие статические и динамические характеристики. Данные результаты указывают на то, что традиционный ПИД-регулятор не может обеспечить высокую точность из-за нелинейности системы. Эффективность работы нечеткого ПИД-регулятора перед традиционным ПИД-регулятором также была доказана в [14, 15].

В [16] для манипулятора с 2 степенями свободы были разработаны четыре регулятора: ПИД-регулятор, нечеткий регулятор Мамдани, нечеткий регулятор Сугэно, гибридный нечеткий регулятор, сочетающий ПИД и нечеткий регулятор Мамдани. Нечеткий регулятор Сугэно показал максимальную скорость и крутящий момент, но при этом имел ошибку положения суставов установившегося состояния. Наибольшая точность определения рабочей точки была достигнута при использовании нечеткого гибридного управления.

В данном исследовании была предложена система управления звеньями манипулятора с 3 степенями свободы, устанавливаемого на квадросотор. Управление осуществляется с помощью нечеткого ПИД-регулятора и учитывает особенности конструкции БЛМ.

Материалы и методы

В ходе исследования в первую очередь было предложено решение прямой задачи кинематики для манипулятора, состоящего из 3 звеньев с 3 степенями свободы. Для поворотного движения двух последовательных звеньев между ними установлено шарнирное соединение (рис. 1). Две последовательные оси шарниров вращения параллельны друг другу. Манипулятор имеет 3 звена весом по 0,15 кг и следующими размерами: $M_1 = 0,15$ м, $M_2 = 0,30$ м, $M_3 = 0,15$ м. Данные размеры выбраны исходя из рабочей длины манипулятора и базового

размера БЛА. Обозначим, что манипулятор перемещает, поднимает и отпускает объект, при этом сохраняя его центр тяжести на вертикальной оси [17].

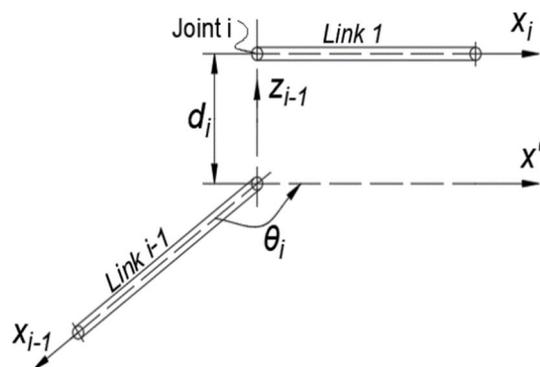


Рис. 1. Схема нумерации звеньев и шарниров манипулятора

Fig. 1. Numbering scheme of manipulator links and joints

Матрица вращения для данного типа соединения выглядит следующим образом [18]:

$${}^{i-1}R_i = \begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 \\ s_i & c_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $c_i = \cos \theta_i$; $s_i = \sin \theta_i$.

Для присвоения систем координат звеньям был использован алгоритм Денавита-Хартенберга. Таким образом, имеется следующий набор геометрических параметров последовательного цепного манипулятора, представленный в табл. 1, где a_i – расстояние от z_{i-1} до z_i вдоль x_{i-1} ; α_i – угол от z_{i-1} до z_i относительно x_{i-1} ; d_i – расстояние от x_{i-1} до x_i вдоль z_i ; θ_i – угол от x_{i-1} до x_i относительно z_i .

Таблица 1. Параметры алгоритма Денавита-Хартенберга трехзвенного манипулятора

Table 1. Parameters of Denavit-Hartenberg algorithm for a three-link manipulator

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	0	M_1	0	θ_1
2	0	M_2	0	θ_2
3	0	M_3	0	θ_3

Система координат i может быть расположена относительно системы координат $i-1$ путем выполнения поворота на угол θ_i . ${}^{i-1}T_i$ – однородная матрица преобразования для определения координат относительного положения звена i относительно звена $i-1$.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 & a_i c_i \\ s_i & c_i & 0 & a_i s_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$${}^0T_i^{COM} = \prod_1^i {}^{i-1}T_i^{COM} = \begin{bmatrix} c_{1..i} & -s_{1..i} & 0 & \sum_{k=1}^{i-1} l_k c_{1..k} + (l_i c_{1..i}) / 2 \\ s_{1..i} & c_{1..i} & 0 & \sum_{k=1}^{i-1} l_k s_{1..k} + (l_i s_{1..i}) / 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Из формулы (1) получаем координаты положения рабочего органа манипулятора с 3 степенями свободы:

$$\begin{cases} x_3 = l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123} \\ y_3 = l_1 s_1 + l_2 s_{12} + l_3 s_{123} . \end{cases} \quad (3)$$

Из формулы (2) получаем координаты центра масс манипулятора с 3 степенями свободы:

$$\begin{cases} x_{COM} = (\sum_1^i {}^0T_i^{COM}(1,4)m_i) / (\sum_1^i m_i) \\ y_{COM} = (\sum_1^i {}^0T_i^{COM}(2,4)m_i) / (\sum_1^i m_i) . \end{cases} \quad (4)$$

Координаты звена i ($x_i; y_i$) относительно исходных координат определяются через прямую кинематику:

$${}^0T_i = \prod_1^i {}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c_{1..i} & -s_{1..i} & 0 & \sum_{k=1}^i l_k c_{1..k} \\ s_{1..i} & c_{1..i} & 0 & \sum_{k=1}^i l_k s_{1..k} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $c_{1..i} = \cos(\theta_1 + \dots + \theta_i)$, $s_{1..i} = \sin(\theta_1 + \dots + \theta_i)$.

Отношения между центром масс двух последовательных звеньев:

$${}^{i-1}T_i^{COM} = \begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 & (l_i c_i) / 2 \\ s_i & c_i & 0 & (l_i s_i) / 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где COM – центр масс.

Матрица центра масс координат звена i имеет вид:

На основе найденных значений положения рабочего органа (3) и положения центра масс (4) трёхзвенного манипулятора решим обратную задачу кинематики (ОЗК) для данного манипулятора с 3 степенями свободы.

Решение ОЗК для манипулятора заключается в нахождении значений положений шарниров с учетом положения и ориентации рабочего органа относительно основания и значений всех геометрических параметров звеньев. Па-

параметры рабочего положения и угла сочленения манипулятора, рассматриваемого в данном исследовании, показаны на рис. 2.

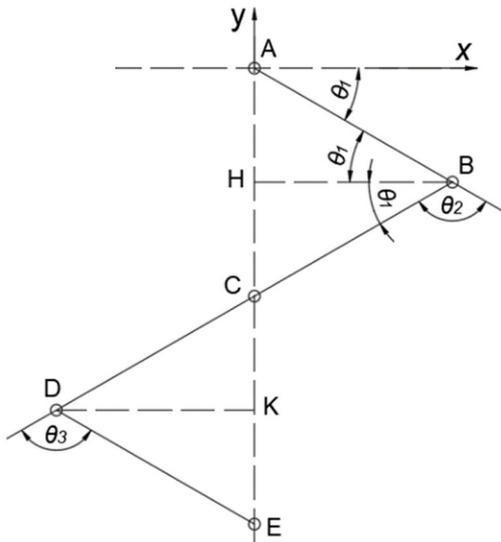


Рис. 2. Параметры угла сочленения манипулятора

Fig. 2. Parameters of the manipulator joint angle

На рис. 2 первое звено обозначено как АВ, второе – ВD, третье – DE. Данные звенья имеют следующее отношение: $AB = DE = BD/2$. Углы θ_1, θ_2 и θ_3 – это углы отклонения последовательных звеньев. Рабочий механизм манипулятора E всегда перемещается по вертикальной оси y. Центром масс манипулятора является средняя точка C звена BD. Поэтому решение ОЗК в данном исследовании выполняется с помощью геометрического метода. Согласно вышеописанному решению прямой задачи кинематики рабочее положение манипулятора, θ_1 и θ_2 всегда меньше 0, а θ_3 всегда больше 0. Координаты рабочего органа – $(0, P_y)$. Из рис. 2 можно определить, что сочлененное положение

первого звена $\theta_1 = A \tan 2(\cos \theta_1, \sin \theta_1)$, второго $\theta_2 = -\pi - 2\theta_1$, третьего – $\theta_3 = \pi + 2\theta_1$. Углы θ_1, θ_2 и θ_3 являются входными данными регулятора.

Далее рассмотрим динамическую модель манипулятора с 3 степенями свободы. Динамические уравнения движения рассматриваемой конструкции могут быть получены с использованием уравнения Лагранжа для каждой обобщенной координаты:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i, \tag{5}$$

где $L = T - U$ – функция Лагранжа, а T и U – суммарная кинетическая энергия и суммарная потенциальная энергия, соответственно, $q_i = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_i]^T$ – параметры угла сочленения манипулятора. Кинетическая энергия задается по формуле:

$$T = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T M \dot{\theta}, \tag{6}$$

где $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dots \ \dot{\theta}_i]^T$; M – обобщенные массовые матрицы для манипулятора.

Потенциальная энергия

$$U = \sum_i [0 \ m_i g \ 0] r_{0_{T_i}^{COM}}, \tag{7}$$

где $r_{0_{T_i}^{COM}}$ определяется как:

$$r_{0_{T_i}^{COM}} = \begin{bmatrix} {}^0 T_i^{COM}(1,4) \\ {}^0 T_i^{COM}(2,4) \\ {}^0 T_i^{COM}(3,4) \end{bmatrix}. \tag{8}$$

Через формулу (8) получаем матрицу переходов Якобиана:

$$J_{T_i} = \begin{bmatrix} \dot{r}_{0_{T_i}COM}(1,1)(\theta_1) & \dot{r}_{0_{T_i}COM}(1,1)(\theta_2) & \dots & \dot{r}_{0_{T_i}COM}(1,1)(\theta_i) \\ \dot{r}_{0_{T_i}COM}(2,1)(\theta_1) & \dot{r}_{0_{T_i}COM}(2,1)(\theta_2) & \dots & \dot{r}_{0_{T_i}COM}(2,1)(\theta_i) \\ \dot{r}_{0_{T_i}COM}(3,1)(\theta_1) & \dot{r}_{0_{T_i}COM}(3,1)(\theta_2) & \dots & \dot{r}_{0_{T_i}COM}(3,1)(\theta_i) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Матрица направляющих косинусов:

$$A_i = \begin{bmatrix} c_{1..i} & -s_{1..i} & 0 \\ s_{1..i} & c_{1..i} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Из (10) имеем производную матрицы направляющих косинусов:

$$dA_i = \begin{bmatrix} \sum_1^j \dot{A}_i(1,1)(\theta_j)\dot{\theta}_j & \sum_1^j \dot{A}_i(1,2)(\theta_j)\dot{\theta}_j & \sum_1^j \dot{A}_i(1,3)(\theta_j)\dot{\theta}_j \\ \sum_1^j \dot{A}_i(2,1)(\theta_j)\dot{\theta}_j & \sum_1^j \dot{A}_i(2,2)(\theta_j)\dot{\theta}_j & \sum_1^j \dot{A}_i(2,3)(\theta_j)\dot{\theta}_j \\ \sum_1^j \dot{A}_i(3,1)(\theta_j)\dot{\theta}_j & \sum_1^j \dot{A}_i(3,2)(\theta_j)\dot{\theta}_j & \sum_1^j \dot{A}_i(3,3)(\theta_j)\dot{\theta}_j \end{bmatrix} \quad (j = i = 1 \div 5).$$

Матрица угловой скорости каждого звена выглядит как:

$$\omega_i = \begin{bmatrix} S_{\omega_i}(3,2) \\ S_{\omega_i}(1,3) \\ S_{\omega_i}(2,1) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где $S_{\omega_i} = dA_i A_i^T$. Из матрицы (11) мы имеем вращательную матрицу Якобиана:

$$J_{R_i} = \begin{bmatrix} \dot{S}_{\omega_i}(1,1)(\dot{\theta}_1) & \dot{S}_{\omega_i}(1,1)(\dot{\theta}_2) & \dots & \dot{S}_{\omega_i}(1,1)(\dot{\theta}_i) \\ \dot{S}_{\omega_i}(2,1)(\dot{\theta}_1) & \dot{S}_{\omega_i}(2,1)(\dot{\theta}_2) & \dots & \dot{S}_{\omega_i}(2,1)(\dot{\theta}_i) \\ \dot{S}_{\omega_i}(3,1)(\dot{\theta}_1) & \dot{S}_{\omega_i}(3,1)(\dot{\theta}_2) & \dots & \dot{S}_{\omega_i}(3,1)(\dot{\theta}_i) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

Из матриц (9), (10) и (12) можно найти матрицу масс манипулятора:

$$M = \sum_1^i (m_i (J_{T_i}^T J_{T_i}) + J_{R_i}^T (A_i I_i A_i^T) J_{R_i}), \quad (13)$$

$$\text{где } I_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_i l_i^2 / 3 \end{bmatrix}.$$

В результате из формул (8)–(10) и (13) определяются $[\ddot{\theta}_1 \quad \ddot{\theta}_2 \quad \ddot{\theta}_3]$ и $[\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3]$.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим планирование траектории движения для манипулятора с 3 степенями свободы. Под траекторией в данном исследовании понимается последовательность движений звена относительно времени [19]. Траектория движения робота зависит как от динамики, так и от кинематики робота [20]. Введем ограничение: планирование траекторий движения звеньев манипулятора с 3 степенями свободы, перемещающегося из положения с углами сочленений q_i в положение с углами сочленений q_f должно происходить не более, чем за 5 секунд. Для того чтобы добиться плавного и непрерывного движения, разработана полиномиальная траектория высокой степени [21]:

$$\theta_k^n(t) = a_n^k t^n + a_{n-1}^k t^{n-1} + \dots + a_2^k t^2 + a_1^k t + a_0^k,$$

где n – степень полинома, k – звено манипулятора, (k и n – натуральное чис-

ло), t – время. Диапазон движений звеньев приведен в табл. 2.

Условия уравнения траектории описаны ниже:

$$\theta_k^j(0) = q_i, \tag{14}$$

$$\theta_k^j(5) = q_f, \tag{15}$$

$$\dot{\theta}_k^j(0) = 0, \tag{16}$$

$$\dot{\theta}_k^j(5) = 0, \tag{17}$$

$$\ddot{\theta}_k^j(0) = 0, \tag{18}$$

$$\ddot{\theta}_k^j(5) = 0, \tag{19}$$

где $q_i = (\theta_{1i}; \theta_{2i}; \theta_{3i}) = (-1,5708; 0; 0)$, $\tag{20}$

$q_f = (\theta_{1f}; \theta_{2f}; \theta_{3f}) = (-0,5236; -2,0944; 2,0944)$. $\tag{21}$

Из условий (14)–(17), (20) и (21) получены траектории третьего порядка манипулятора:

$$\theta_1^3 = -0,0168t^3 + 0,1257t^2 - 1,5708,$$

$$\theta_2^3 = 0,0335t^3 - 0,2513t^2,$$

$$\theta_3^3 = -0,0335t^3 + 0,2513t^2.$$

Из условий (14)–(17) и (19)–(21) получены траектории четвертого порядка манипулятора:

$$\theta_1^4 = 0,0050t^4 - 0,0670t^3 + 0,2513t^2 - 1,5708,$$

$$\theta_2^4 = -0,0101t^4 + 0,1340t^3 - 0,5027t^2,$$

$$\theta_3^4 = 0,0101t^4 - 0,1340t^3 + 0,5027t^2.$$

Из условий (17)–(24) получены траектории пятого порядка манипулятора:

$$\theta_1^5 = 0,0020t^5 - 0,0251t^4 + 0,0838t^3 - 1,5708,$$

$$\theta_2^5 = -0,0040t^5 + 0,0503t^4 - 0,1676t^3,$$

$$\theta_3^5 = -0,0040t^5 + 0,0503t^4 - 0,1676t^3.$$

Таблица 2. Параметры начального и конечного положения звеньев

Table 2. Parameters of the initial and final joint positions

Номер звена / Number of link	Переменные сочленения / Variable articulations	Начальная позиция, рад / Starting position, rad	Конечная позиция, рад / Final position, rad	Диапазон углов, рад / Range of angles, rad
1	θ_1	-1,5708	-0,5236	-1,0472
2	θ_2	0	-2,0944	2,0944
3	θ_3	0	2,0944	2,0944

Приведенные выше уравнения траекторий являются входными данными для разрабатываемого в данной статье регулятора.

Для управления манипулятором с 3 степенями свободы был разработан самонастраивающийся нечеткий ПИД-регулятор. Схема системы управления для каждого звена манипулятора (рис. 3) со-

стоит из двух частей: ПИД-регулятора и нечеткого ПИД-вывода с использованием метода Мамдани. Структура нечеткого ПИД-вывода включает два входа и три выхода. Входными сигналами являются сигнал ошибки $e(t)$ и интегрирование ошибки $\Delta e(t)$. K'_p , K'_i и K'_d являются тремя выходными сигналами.

Пусть диапазонами переменных параметров ПИД-регулятора являются $[K_{Pmin}, K_{Pmax}]$, $[K_{Imin}, K_{Imax}]$ и $[K_{Dmin}, K_{Dmax}]$. Диапазон каждого параметра был опре-

делен на основе экспериментальных ПИД-регуляторов, таких как: $K_P \in [0, 15]$, $K_I \in [0,001, 0,005]$ и $K_D \in [0,1, 0,2]$.

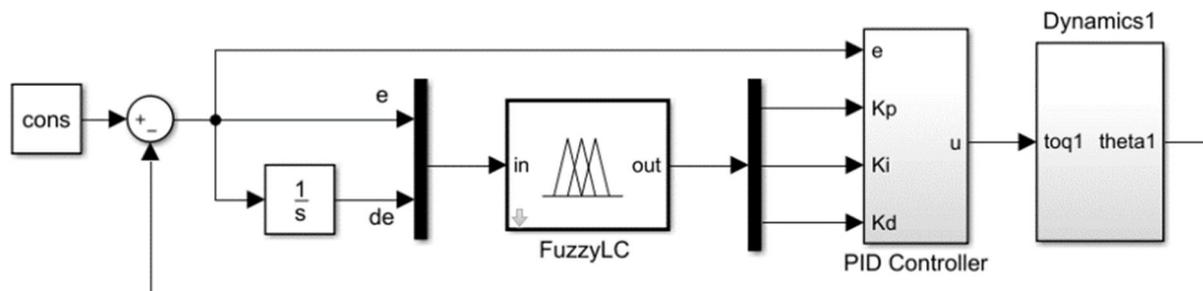


Рис. 3. Структурная схема нечеткого самонастраивающегося ПИД-регулятора

Fig. 3. Structural diagram of a fuzzy self-adjusting PID-controller

Выходы K'_P , K'_I и K'_D описываются следующим образом:

$$K'_P = \frac{K_p - K_{Pmin}}{K_{Pmax} - K_{Pmin}};$$

$$K'_I = \frac{K_I - K_{Imin}}{K_{Imax} - K_{Imin}};$$

$$K'_D = \frac{K_D - K_{Dmin}}{K_{Dmax} - K_{Dmin}}.$$

Каждая переменная входов нечеткого регулятора имеет семь нечетких наборов в диапазоне: отрицательный-большой (NB), отрицательный-средний (NM), отрицательный-маленький (NS), нулевой (ZE), положительный-маленький (PS), положительный-средний (PM), положительный-большой (PB). Функция принадлежности двух входов показана на рис. 4.

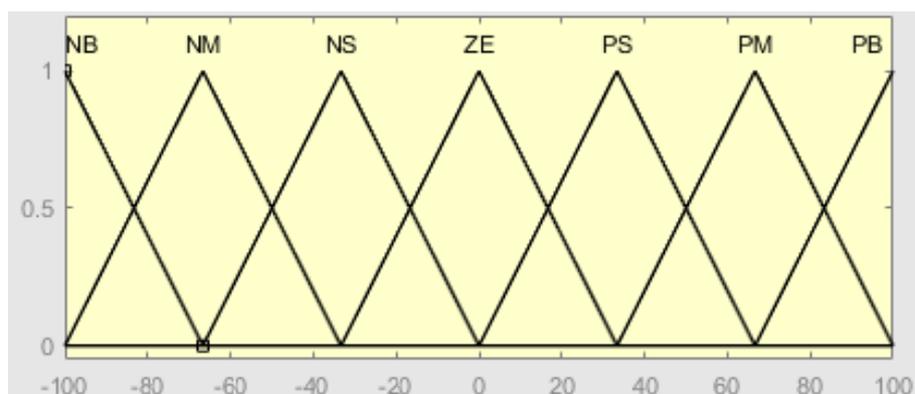


Рис. 4. Функции принадлежности $e(t)$ и $\Delta e(t)$

Fig. 4. Membership functions $e(t)$ and $\Delta e(t)$

Три треугольные функции принадлежности, используемые для K'_I с тремя переменными нечеткого множества,

имеют лингвистические значения: S (малый), M (средний) и B (большой). K'_P и K'_D имеют два нечетких множе-

ства: S-образная и Z-образная функции принадлежности.

Нечеткое правило записывается в соответствии с ответом шага, который делится на 4 области, обозначенные на рис. 5: а) время запаздывания; б) время нарастания; в) перерегулирование; д) время установления.

Для достижения быстрого времени нарастания в области 1 необходим большой управляющий сигнал.

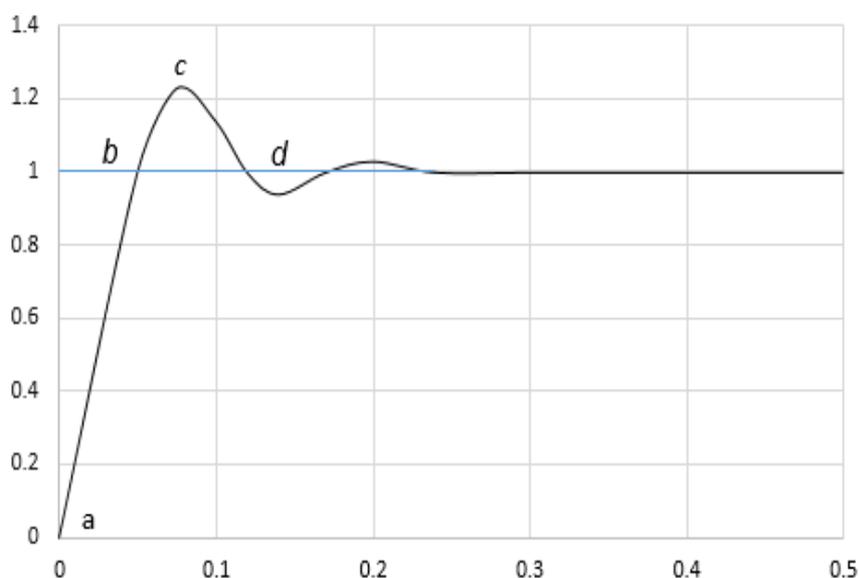


Рис. 5. Шаговый ответ для системы управления

Fig. 5. Step response for a control system

Когда в области 2 ошибка становится отрицательной, для уменьшения возникающего перерегулирования система должна замедлиться. Это достигается путем уменьшения пропорционального усиления малого интегрального усиления и большого производного усиления. Таким образом, база правил, которая представляет данный случай, выглядит следующим образом: если e – это ZE, а Δe – это NB, то K'_p – это S,

Чтобы устранить возникающую ошибку, необходимо выделить интегральный коэффициент усиления, а для ускорения отклика необходимо наличие производного усиления. Чтобы обеспечить высокий степень контроля, сигнал ПИД-регулятора должен иметь большое пропорциональное усиление. База правил, представляющая область 1, записывается следующим образом: если e – это PB, а Δe – это ZE, то K'_p – это B, K'_i – S, а K'_d – S.

K'_i – S, а K'_d – B. Остальные случаи настраиваются аналогичным образом.

Затем в первую очередь были проведены испытания разработанной системы управления манипулятором при отсутствии внешних возмущений для трех различных ситуаций. Первая ситуация – рабочий механизм $(0; P_y)$ перемещается из координаты $(0; -0,60)$ в координату $(0; -0,55)$ без полезной

нагрузки; вторая – манипулятор перемещается по тем же координатам, неся 0,1 кг полезной нагрузки и, наконец, третья – манипулятор повторяет этот же путь неся 0,15 кг полезной нагрузки. Как можно заметить из табл. 3, в проведенных экспериментах погрешность результатов была относительно небольшой. Во всех случаях наибольшее значение погрешности 2,942% было между

желаемым и фактическим углом звена 2 в случаях, когда манипулятор нес 0,15 кг полезной нагрузки, 2,544% с 0,1 кг полезной нагрузки и 1,732% без полезной нагрузки. В случае, когда манипулятор нес 0,10 кг и 0,15 кг полезной нагрузки, отклонение центра масс по горизонтали составило менее 1 мм, что приемлемо на практике.

Таблица 3. Погрешность между желаемым и фактическим углом

Table 3. Margin of error between desired and actual angle values

Полезная нагрузка, кг / Payload, kg	Без полезной нагрузки / Without payload			0,10 (кг)			0,15 (кг)		
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_1	θ_2	θ_3	θ_1	θ_2	θ_3
Угол θ									
Желаемый угол, рад	-1,160	-0,822	0,822	-1,160	-0,822	0,822	-1,160	-0,822	0,822
Фактический угол, рад	-1,161	-0,808	0,819	-1,160	-0,801	0,817	-1,159	-0,798	0,816
Погрешность (%)	0,086	1,732	0,305	0,000	2,544	0,599	0,086	2,942	0,772

Прежде чем система достигла стабилизированного состояния, максимальный горизонтальный сдвиг центра масс составил 12,5 мм. Стабилизация системы произошла через 3 секунды с небольшим перерегулированием.

В экспериментах с полезной нагрузкой после взятия объекта манипулятор переходит в позицию для транспортировки. Рабочий механизм ($0; P_y$) перемещается из координаты $P_1(0; -0,60)$ в координату $P_2(0; -0,30)$. Для управления манипулятором в данном случае

используется метод перемещения рабочего концевое механизма из координаты P_1 в P_2 по заданным точкам.

Для тестирования работы данного метода были рассмотрены 3 случая перемещения рабочего органа по 12, 25 и 50 заданным точкам. Экспериментальные результаты, полученные во всех трех случаях, довольно сильно отличаются. В случае 12 заданных точек горизонтальный сдвиг центра масс составил около 12,5 мм, а рабочего органа – около 27,5 мм, в случае 25 точек около

6 мм и 14 мм, соответственно, и в случае 50 точек около 4,3 мм и 10,2 мм, соответственно.

Для подтверждения гипотезы о том, что траектории движения возможно совершать с непрерывной скоростью и плавным ускорением, сформулированы три траекторные задачи с использованием полиномов 3-й, 4-й и 5-й степеней. Данные полиномы гарантируют, что во время генерируемых траекторий робот движется в соответствии с ограничением ускорения, чтобы обеспечить безопасную навигацию БЛА. В полиномах также учитываются скоростные условия – скорости каждого звена в начале и в конце движения равны нулю. В ходе проведения экспериментов было получено, что при управлении манипулятором по 5-ой степени полинома достигается наибольший горизонтальный сдвиг: 8 мм для центра масс и 17,5 мм для рабочего органа, а также скорость и ускорение в начале и конце движения не равны 0. Такая большая погрешность связана с тем, что скорость и ускорение манипулятора не формируются по запросу.

При управлении манипулятором по 3-й и 4-й степени полинома центр масс и рабочий орган перемещаются непрерывно и плавно по заданной траектории. Максимальные горизонтальные сдвиги центра масс и рабочего органа по полиному 3-й степени составляют 2,8 мм и 7,8 мм, соответственно. Траектории движения центра масс и рабочего органа всегда находятся справа от вертикальной оси; причина в том, что тра-

ектория движения второго звена имеет некоторые погрешности. Экспериментальный угол сочленения всегда меньше желаемого значения. Однако погрешность настолько мала, что вполне подходит для реального применения. Примечательным моментом в 3-м полиноме является то, что скорость всегда отвечает значениям в соответствии с условиями построения уравнения траектории. Скорость в начальный и конечный моменты времени достигает нулевого значения, а ускорение подчиняется закону движения.

Наилучшие результаты управления манипулятором достигаются при использовании полинома 4-й степени. Максимальный горизонтальный сдвиг центра масс и рабочего органа манипулятора составляют 2,8 мм и 7,5 мм, соответственно. В конце движения горизонтальный сдвиг центра масс составляет всего 1,25 мм. Граничные условия скорости в начальный и конечный моменты времени отвечают заданным ограничениям и равняются 0 и 5 секундам, соответственно.

Выводы

В данной работе исследованы кинематическая и динамическая модель манипулятора с тремя степенями свободы, уставленного на беспилотном летательном аппарате мультироторного типа. Для стабилизации управления беспилотным летательным манипулятором был разработан нечеткий ПИД-регулятор. Динамический отклик каждого звена соответствуют выдвинутым

к системе требованиям и не превышает 3 секунд с небольшим перерегулированием. Проведенное моделирование разработанной системы управления манипулятором при отсутствии возмущений показало, что предложенная система управления удовлетворяет заданным

требованиям и обеспечивает непрерывное и плавное перемещение звеньев манипулятора по рассчитанной траектории. Дальнейшие исследования будут направлены на моделирование разработанной системы при воздействии возмущений.

Список литературы

1. Luo C., Yu L., Ren P. A. Vision-Aided Approach to Perching a Bioinspired Unmanned Aerial Vehicle // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018. № 65(5). P. 3976-3984. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2764849>
2. Korpela C.M., Danko T.W., Oh P. Y. MM-UAV: Mobile manipulating unmanned aerial vehicle // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2012. № 65(1-4). <https://doi.org/10.1007/s10846-011-9591-3> 93-101.
3. Ронжин А.Л., Нгуен В.В., Соленая О. Анализ проблем разработки беспилотных летательных манипуляторов и физического взаимодействия БЛА с наземными объектами // *Труды МАИ*. 2018. № 98. P. 28-28. URL: http://www.trudymai.ru/upload/iblock/3ee/Ronzhin_Nguen_Solenaya_rus.pdf?lang=en&issue=98
4. Cardona G.A., Tellez-Castro D., Mojica-Nava E. Cooperative Transportation of a Cable-Suspended Load by Multiple Quadrotors // *IFAC-PapersOnLine*. 2019. № 52(20). P. 145-150. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.149>
5. Khalifa A. Novel quadrotor manipulation system // arXiv:1904.05090v1 [cs.RO]. – 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1904.05090.pdf>
6. Ermolov I. Industrial Robotics Review. In: *Studies in Systems // Decision and Control*. 2020. № 272. P. 195-204. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37841-7_16
7. Patil A., Kulkarni M., Aswale A. Analysis of the inverse kinematics for 5 DOF robot arm using D-H parameters // *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics*. 2017. P. 688-693. <https://doi.org/10.1109/RCAR.2017.8311944>
8. Vu Q., Ronzhin A. A Model of Four-Finger Gripper with a Built-in Vacuum Suction Nozzle for Harvesting Tomatoes // *Proceedings of 14th International Conference on Electro-mechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. 2020. P. 149-160. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_13
9. Bezruk G.G., Martynova L.A., Saenko I.B. Dynamic Method of Searching Anthropogenic Objects in Use of Seabed with Autonomous Underwater Vehicles // *SPIIRAS Proceedings*. 2018. № 3. P. 203-226. <https://doi.org/10.15622/sp.58.9>

10. Medvedev M.Y., Kostjukov V.A., Pshikhov V.K. Optimization of mobile robot movement on a plane with finite number of repeller sources // *SPIIRAS Proceedings*. 2020. № 19. P. 43-78. <https://doi.org/10.15622/10.15622/sp.2020.19.1.2>.
11. Khalifa A., Fanni M., Ramadan A., Abo-Ismael A. New quadrotor manipulation system: Inverse kinematics, identification and ric-based control // *International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering (IJMECH)*. 2015. № 4(3). P. 39-58. <https://doi.org/10.14810/ijmech.2015.4304>
12. Kabir U., Hamza M.F., Haruna A., Shehu G.S. Performance analysis of PID, PD and fuzzy controllers for position control of 3-DOF robot manipulator // *Zaria Journal of Electrical Engineering Technology, Department of Electrical Engineering*. 2019. № 8(1). P. 18-25. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1910/1910.12076.pdf>
13. Nyein T.H.I.D.A., Z.M. Oo, Hlaing H.T. Fuzzy Based Control of Two Links Robotic Manipulator // *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*. 2019. № 8. P. 1-7. URL: <http://ijsetr.com/uploads/465213IJSETR17300-01.pdf>
14. Sarkhel P., Banerjee N., Hui N.B. Fuzzy logic-based tuning of PID controller to control flexible manipulators // *SN Applied Sciences*. 2020. № 2. P. 11 – 24. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2877-y>
15. Saxena A., Kumar J., Deolia V.K. Design a Robust Intelligent Controller for Rigid Robotic Manipulator System having Two Links and Payloads // *2020 International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)*. 2020. P. 159-163.
16. Aliabadi M., Mashayekhifard J., Mohazabi B. Intelligent and classic control of rehabilitation robot with robust pid and fuzzy methods // *Majlesi Journal of Mechatronic Systems*. 2020. № 9 (1). P. 31-36. <http://journals.iaumajlesi.ac.ir/ms/index/index.php/ms/article/view/435>
17. Nguyen V., Saveliev A., Ronzhin A. Mathematical Modelling of Control and Simultaneous Stabilization of 3-DOF Aerial Manipulation System // *In International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. 2020. P. 253-264. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3_25
18. Flying robots / S. Leutenegger, C. Hürzeler, A.K. Stowers, K. Alexis, M.W. Achtelik, D. Lentink, P.Y. Oh, R. Siegwart // *Springer Handbook of Robotics*. Springer, Cham. 2016. P. 623-670. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1>
19. Bharadwaj D., Prateek M. Kinematics and dynamics of lower body of autonomous humanoid biped robot // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2019. № 8(4). P. 141-146. URL: https://www.researchgate.net/publication/331062407_Kinematics_and_dynamics_of_lower_body_of_autonomous_humanoid_Biped_Robot

20. Gupta A., Mondal A.K., Gupta M.K. Kinematic, Dynamic analysis and control of 3 DOF upper-limb robotic exoskeleton // *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. – 2019. № 52(3). P. 515-520. <https://doi.org/10.18280/jesa.520311>

21. Barghi Jond H., V Nabiyev V., Benveniste R. Trajectory Planning Using High Order Polynomials under Acceleration Constraint // *Journal of Optimization in Industrial Engineering*. 2016. № 10(21). P. 1-6. URL: http://qjie.ir/article_255_37.html

References

1. Luo C., Yu L., Ren P. A Vision-Aided Approach to Perching a Bioinspired Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, no. 65(5), pp. 3976-3984. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2764849>.

2. Korpela C.M., Danko T.W., Oh P. Y. MM-UAV: Mobile manipulating unmanned aerial vehicle. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2012, no.65(1-4). <https://doi.org/10.1007/s10846-011-9591-3> 93-101.

3. Ronzhin A.L., Nguyen V.V., Solyonaya O. Analiz problem razrabotki bespilotnykh letatel'nykh manipulyatorov i fizicheskogo vzaimodeistviya BLA s nazemnymi ob"ektami [Analysis of the problems of the development of unmanned aerial manipulators and the physical interaction of UAVs with ground objects]. *Trudy MAI = Trudy MAI*, 2018, no. 98, pp. 28-28. Available at: http://www.trudymai.ru/upload/iblock/3ee/Ronzhin_Nguen_Solenaya_rus.pdf?lang=en&issue=98 (In Russ.).

4. Cardona G.A., Tellez-Castro D., Mojica-Nava E. Cooperative Transportation of a Cable-Suspended Load by Multiple Quadrotors. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, no. 52(20), pp. 145-150. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.149>

5. Khalifa A. Novel quadrotor manipulation system // arXiv:1904.05090v1 [cs.RO]. – 2019. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1904.05090.pdf>

6. Ermolov I. Industrial Robotics Review. In: Studies in Systems. *Decision and Control*, 2020, no. 272, pp. 195-204. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37841-7_16

7. Patil A., Kulkarni M., Aswale A. Analysis of the inverse kinematics for 5 DOF robot arm using D-H parameters. *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics*, 2017, pp. 688-693. <https://doi.org/10.1109/RCAR.2017.8311944>

8. Vu Q., Ronzhin A. A Model of Four-Finger Gripper with a Built-in Vacuum Suction Nozzle for Harvesting Tomatoes. *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. 2020, pp. 149-160. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_13

9. Bezruk G.G., Martynova L.A., Saenko I.B. Dynamic Method of Searching Anthropogenic Objects in Use of Seabed with Autonomous Underwater Vehicles. *SPIIRAS Proceedings*, 2018, no. 3, pp. 203-226. <https://doi.org/10.15622/sp.58.9>

10. Medvedev M.Y., Kostjukov V.A., Pshikhov V.K. Optimization of mobile robot movement on a plane with finite number of repeller sources. *SPIIRAS Proceedings*, 2020, no. 19, pp. 43-78. <https://doi.org/10.15622/10.15622/sp.2020.19.1.2>.

11. Khalifa A., Fanni M., Ramadan A., Abo-Ismael A. New quadrotor manipulation system: Inverse kinematics, identification and ric-based control. *International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering (IJMECH)*, 2015, no. 4(3), pp. 39-58. <https://doi.org/10.14810/ijmech.2015.4304>

12. Kabir U., Hamza M.F., Haruna A., Shehu G.S. Performance analysis of PID, PD and fuzzy controllers for position control of 3-DOF robot manipulator. *Zaria Journal of Electrical Engineering Technology, Department of Electrical Engineering*, 2019, no. 8(1), pp. 18-25. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1910/1910.12076.pdf>

13. Nyein T.H.I.D.A., Z.M. Oo, Hlaing H.T. Fuzzy Based Control of Two Links Robotic Manipulator. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 2019, no. 8, pp. 1-7. Available at: <http://ijsetr.com/uploads/465213IJSETR17300-01.pdf>

14. Sarkhel P., Banerjee N., Hui N.B. Fuzzy logic-based tuning of PID controller to control flexible manipulators. *SN Applied Sciences*, 2020, no.2, pp. 11-24. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2877-y>

15. Saxena A., Kumar J., Deolia V.K. Design a Robust Intelligent Controller for Rigid Robotic Manipulator System having Two Links and Payloads. *2020 International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)*, 2020, pp. 159-163.

16. Aliabadi M., Mashayekhifard J., Mohazabzabi B. Intelligent and classic control of rehabilitation robot with robust pid and fuzzy methods. *Majlesi Journal of Mechatronic Systems*, 2020, no. 9 (1), pp. 31-36. Available at: <http://journals.iaumajlesi.ac.ir/ms/index/index.php/ms/article/view/435>

17. Nguyen V., Saveliev A., Ronzhin A. Mathematical Modelling of Control and Simultaneous Stabilization of 3-DOF Aerial Manipulation System. *In International Conference on Interactive Collaborative Robotics*, 2020, pp. 253-264. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3_25

18. Leutenegger S., Hürzeler C., Stowers A.K., Alexis K., Achtelik M.W., Lentink D., Oh P.Y., Siegwart R. Flying robots. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, Cham. 2016, pp. 623-670. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1>

19. Bharadwaj D., Prateek M. Kinematics and dynamics of lower body of autonomous humanoid biped robot. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2019, no. 8(4), pp. 141-146. Available at: https://www.researchgate.net/publication/331062407_Kinematics_and_dynamics_of_lower_body_of_autonomous_humanoid_Biped_Robot

20. Gupta A., Mondal A.K., Gupta M.K. Kinematic, Dynamic analysis and control of 3 DOF upper-limb robotic exoskeleton. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 2019, no. 52(3), pp. 515-520. <https://doi.org/10.18280/jesa.520311>

21. Barghi Jond H., V Nabiyev V., Benveniste R. Trajectory Planning Using High Order Polynomials under Acceleration Constraint. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 2016, no. 10(21), pp. 1-6. Available at: http://qjie.ir/article_255_37.html

Информация об авторах / Information about the Authors

Нгуен Ван Винь, аспирант кафедры электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: vinhnguyen.tccnqr@gmail.com

Vinh V. Nguyen, Post-Graduate Student, Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: vinhnguyen.tccnqr@gmail.com

Усина Елизавета Евгеньевна, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социокиберфизических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: lizzzi96@mail.ru

Elizaveta E. Usina, Junior Researcher of Laboratory of Big Data in Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: lizzzi96@mail.ru