

Торайғыров университетінің
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 3 (2020)

Павлодар

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

KZ19VRY00029272

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных
и информационных систем, электромеханики
и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.

к.т.н., доцент

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD, доцент*

Ответственный секретарь

Приходько Е. В., *к.т.н., профессор*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*
Новожилов Т. А., *к.т.н., доцент (Россия)*
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*
Нефтисов А. В., *доктор PhD, доцент*
Шокубаева З. Ж. *технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

<https://doi.org/10.48081/DOUY6702>**К. И. Танырбергенова, Т. Мирзалиқызы**Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Нур-Султан

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ИНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛИЗА В ЗАДАЧЕ АППРОКСИМАЦИИ РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА

В статье рассматривается рабочая область робота-манипулятора типа «двухзвенник». Цель работы состоит в разработке алгоритма аппроксимации рабочей области робота-манипулятора с использованием методов интервального анализа, моделирования и анализе полученных результатов с использованием возможностей языка программирования и инструментария Python. Проведено исследование рабочей области робота-манипулятора с учетом налагаемых ограничений, в расчетах использованы методы интервального анализа, что позволило избежать неточности при округлении результатов. Был разработан алгоритм с использованием средств языка программирования Python и методами интервальной арифметики (анализа). Полученные результаты представлены в визуальной форме. Результаты могут быть использованы в практических целях для улучшения, уточнения и оптимизации работы рабочего инструмента робота-манипулятора при перемещении на отведенной рабочей поверхности.

Ключевые слова: робот манипулятор, рабочая область робота, кинематика робота, прямая задача кинематики, интервальная арифметика, интервальный анализ, робототехника, Python.

Введение

В задачах проектирования и управления роботами важнейшую роль играют методы математического моделирования. Математическое моделирование и программная реализация алгоритма аппроксимации рабочей области робота служит предметом данного исследования.

Большая часть робототехнических комплексов сосредоточены в США, Японии и Европе. Касательно Европы – это робототехнические ансамбли

Германии, Франции и Великобритании, и у последней, к удивлению, в меньшей степени. Так же стремительно развивается данная стезя в Корею и Китае. Также следует отметить, что на данные страны приходится основной массив патентных заявок в области робототехники [1]. В своем ежегодном Послании народу Казахстана первый президент Республики Казахстан Н. А. Назарбаев обратил внимание на необходимость развивать в стране отрасли робототехники и геной инженерии [2].

Робототехника является одним из приоритетных направлений развития научно-технического прогресса в настоящее время. Роботы находят свое применение в производстве, космической и военной промышленности, автомобилестроении, медицине и многих других областях. Вследствие этого робототехника является активно развивающейся областью научных исследований. В частности, можно перечислить следующие исследовательские группы, занимающиеся тематикой, близкой к теме проекта [3, 4]:

- 1) Группа J-P-Merlet (Франция);
- 2) Группа Aundre Preumont (Бельгия);
- 3) Группа Nabil Simaan (Израиль);
- 4) Группа Harris D.M.J. (Великобритания).

Объектом исследования являются методы аппроксимации рабочей области робота-манипулятора типа «двухзвенник». Данная проблема важна также тем, что задача оценки движения рабочего устройства робота в конкретную точку в пространстве невозможна без наличия сколько-нибудь приближенной информации об его рабочей области. **Целью исследования** является разработка и реализация методов аппроксимации рабочей области робота с предопределенной точностью с учетом различных ограничений.

Были изучены сторонние алгоритмы аппроксимации рабочей области для разных моделей роботов, такие как метод неравномерных покрытий, предложенный Евтушенко Ю. Г., метод Кравчика [5, 6, 7].

Основная часть. Методы исследования

Имеется манипулятор робота с двумя сегментами и двумя шарнирами, изображенный на рисунке 1. На одном из концов манипулятора находится конечное звено, которое определяет рабочий инструмент, положением которого необходимо управлять, то есть перемещать в нужную нам точку координат. Следует отметить, что мы не имеем непосредственной возможности контролировать позицию конечного звена и можем только поворачивать шарниры, на месте которых выступают двигатели. Задача инверсной кинематики заключается в нахождении наилучшего способа поворота соединений для перемещения конечного звена в нужную позицию.

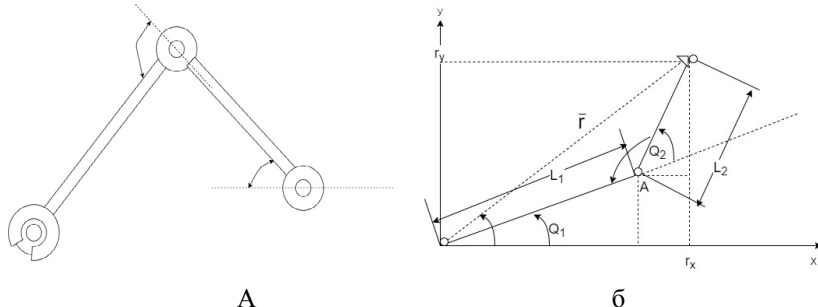


Рисунок 1 – робот– манипулятор с двумя сегментами и двумя шарнирами, а) модель робота б) схема робота с обозначениями

Введем обозначение \vec{r} – радиус-вектора, определяющего положение рабочего органа в пространстве (декартова система координат). Спроектировав его на оси координат, получим систему скалярных уравнений. Эти уравнения и называют кинематическими уравнениями движения. В нашем случае вид системы уравнений примет следующий вид согласно формуле (1):

$$\begin{cases} r_x = L_1 * \cos(Q_1) + L_2 * \cos(Q_1 + Q_2) \\ r_y = L_1 * \sin(Q_1) + L_2 * \sin(Q_1 + Q_2) \end{cases} \quad (1)$$

где r_x, r_y – проекция вектора \vec{r} на ось x и y соответственно, L_1 – длина плеча робота, L_2 – длина предплечья, Q_1 – угол между осью абсцисс и плечом робота, Q_2 – угол между предплечьем и смещенным положением оси абсцисс согласно точке отсчета.

Вид системы кинематических уравнений с налагаемыми ограничениями опишем в формуле (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} r_x = L_1 * \cos(Q_1) + L_2 * \cos(Q_1 + Q_2), \\ r_y = L_1 * \sin(Q_1) + L_2 * \sin(Q_1 + Q_2), \\ Q_{1min} < Q_1 < Q_{1max}, \\ Q_{2min} < Q_2 < Q_{2max}, \\ 0 < L_1 < m = const, \\ 0 < L_2 < M = const, \\ xm < r_x < XM, \quad ym < r_y < YM, \\ \Omega = \{ x, y \in R \mid x = r_x, y = r_y \}, \\ x_a = L_2 * \cos(Q_2), \\ x_b = L_2 * \sin(Q_2), \end{array} \right. \quad (2)$$

где: $Q_{1min}, Q_{1max}, Q_{2min}, Q_{2max}$ – минимальные и максимальные возможные значения Q_1, Q_2 , с учетом самопересечения (подсчитаны эвристическим методом), m, M – максимальные допустимые значения длины плеча и предплечья соответственно (согласно параметрам конструкции), x_m, X_M, y_m, Y_M – ограничения на нижнюю и верхнюю границы значений для радиус-вектора (рабочая поверхность), $\Omega \{x, y \in R \mid x = x(t), y = y(t)\}$, x_a, x_b – проекция r_x, r_y на оси в системе отчета локтя.

На языке Python была реализована программа, выполняющая задачу аппроксимации рабочей области робота многозвенника, моделирование и анализ рабочей области робота-манипулятора методом интервального анализа с учетом налагаемых ограничений. Python — один из самых популярных языков программирования в мире, в свежем рейтинге TIOBE он занимает 3 место [8].

Среда разработки PyCharm 2019.3. Структура проекта изображена на рисунке 2.

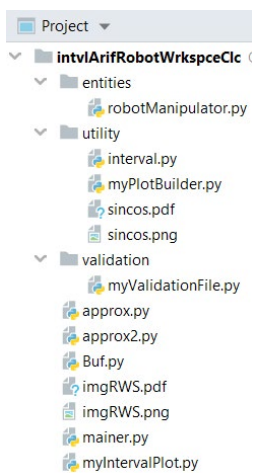


Рисунок 2 – структура проекта

Первоначально был разработан алгоритм решения прямой задачи кинематики для робота манипулятора типа «многозвенник» с применением интервального анализа.

Блок-схема алгоритма работы программы приведена на рисунке 3 ниже.

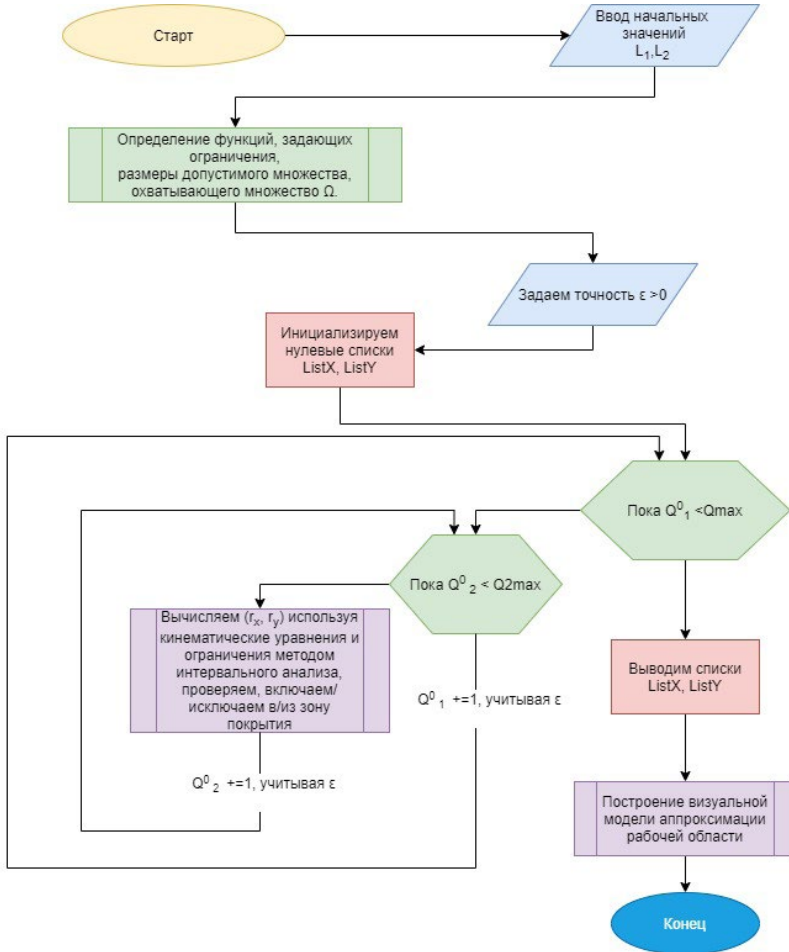


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма работы программы

Концептуальное описание функции построения графиков рабочей области приведено ниже:

```

def forwardSolutionsPlotBuilder(self):
    print('You chose forward method ')
    self.x=self.L1*math.cos(math.radians(self.Q1))
    self.y=self.L1*math.sin(math.radians(self.Q1))
    print('\n x = ',self.x, ' y = ', self.y)
    
```

```
rnd=[0,self.x]
yrs = [0,self.y]
print(rnd)
print(yrs)
fig, ax = plt.subplots(figsize=(5, 3))
ax.stackplot(yrs, rnd, labels=['Robotic'])
ax.set_title('Robot Manipulators working space')
ax.legend(loc='upper left')
ax.set_ylabel('Y axis')
ax.set_xlabel('X axis')
ax.set_xlim(xmin=yrs[0], xmax=yrs[1])
fig.tight_layout()
plt.show()
return self.x,self.y
```

Для работы с графиками была использована библиотека `matplotlib`.

Вся логика операций реализована с использованием методов интервального анализа. Предложенный алгоритм аппроксимации рабочей области робота с использованием методов интервального анализа заключается в следующем: при вычислении допустимых значений и подстановке неизвестных все они представлялись в виде интервалов. Интервалы получены путем деления начальной области на сетки размерами 10X10, 100X100 и т.д. Далее над интервалами из полученной сетки проводились операции, сетка проводилась через систему уравнений и ограничений согласно методам интервального анализа и выводился результат. Основные правила, методы и операции интервального анализа взяты из [9].

Результаты исследования

Результат работы алгоритма аппроксимации рабочей области с применением интервального анализа с дифференцированными ограничениями, заданной точностью ε и с начальными данными $L_1=30$, $L_2=20$, $Q_1 \in [0, \pi]$, $Q_2 \in [0, \pi]$ на примере сетки интервалов размерностью 10 на 10 представлен на рисунке 4.

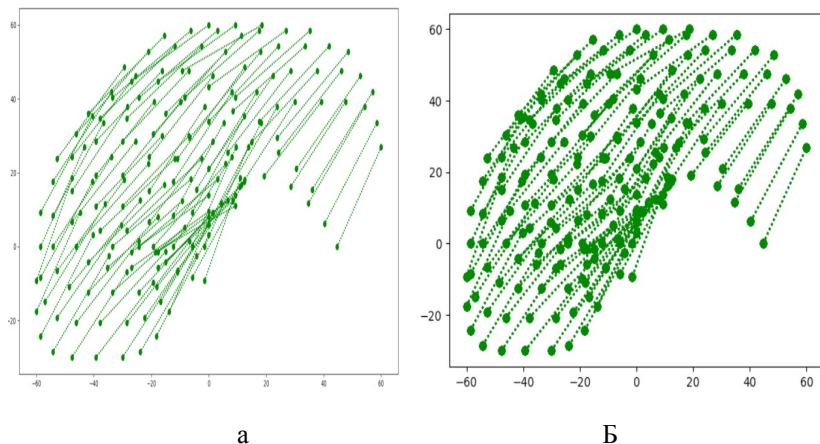


Рисунок 4 – Аппроксимация рабочей области с заданной точностью (сетка 10 на 10) а) $\varepsilon=5$, б) $\varepsilon=1$

Результат работы алгоритма аппроксимации рабочей области с применением интервального анализа с дифференцированными ограничениями, заданной точностью $\varepsilon=5$ и с начальными данными $L_1=30$, $L_2=20$, $Q_1 \in [0, \pi]$, $Q_2 \in [0, \pi]$ на примере сетки интервалов размером 100 на 100 представлен на рисунке 5.

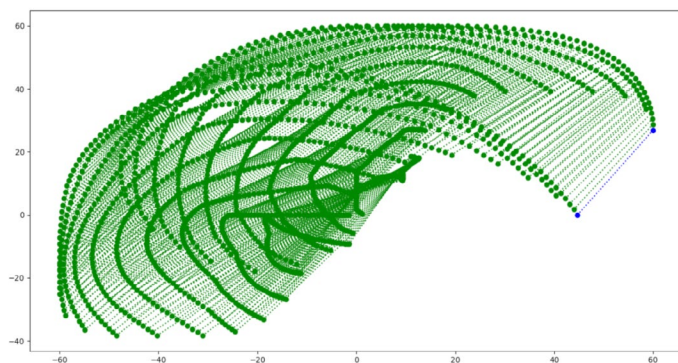


Рисунок 5 – Аппроксимация рабочей области с заданной точностью (сетка 100 на 100), $\varepsilon=5$

Результат работы алгоритма аппроксимации рабочей области с применением интервального анализа с дифференцированными

ограничениями, заданной точностью $\varepsilon=1$ и с начальными данными $L_1=30$, $L_2=20$, $Q_1 \in [0, \pi]$, $Q_2 \in [0, \pi]$ на примере сетки интервалов размером 100 на 100 представлен на рисунке 6.

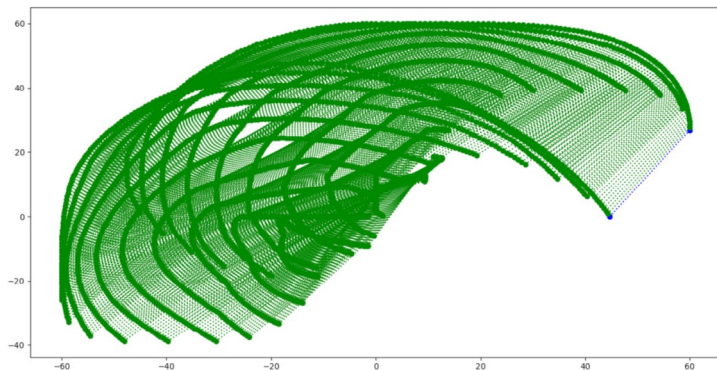


Рисунок 5 –Аппроксимация рабочей области с заданной точностью (сетка 100 на 100), $\varepsilon=1$

Результаты исследования: была выполнена задача аппроксимации рабочей области робота манипулятора с использованием методов интервального анализа с заданной точностью ε , были смоделированы положения рабочего органа, решена прямая задача кинематики робота.

Выводы

Результаты могут быть использованы в практических целях для улучшения, уточнения и оптимизации работы рабочего инструмента роботоманипулятора при перемещении на отведенной рабочей поверхности с учетом ограничений.

Список использованных источников

1 **Keisner, A., Raffo, J., Wunsch-Vincent, S.** Robotics : Breakthrough Technologies, Innovation, Intellectual Property. // Foresight and STI Governance. – 2016. – Vol. 10. – No. 2. – P. 7–27.

2 Официальный сайт президента республики Казахстан / Послание Президента Республики Казахстан Н.Назарбаева народу Казахстана. 17 января 2014 г. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.akorda.kz/ru/addresses/addresses_of_president/poslanie-prezidenta-respubliki-kazahstan-nnazarbaeva-narodu-kazahstana-17-yanvaryaya-2014-g.

- 3 **Merlet, J. P.** Parallel robots. – Springer Science & Business Media, 2006. – Т. 128.
- 4 **Bajo, A., Simaan, N.** Kinematics-Based Detection and Localization of Contacts Along Multisegment Continuum Robots. IEEE Transactions on Robotics. – TRob. – 2012.
- 5 **Evtushenko, Y. G., Posypkin, M. A.** Nonuniform covering method as applied to multicriteria optimization problems with guaranteed accuracy // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2013. – Т. 53. – No. 2. – P. 144.
- 6 **Posypkin, M. A.** Method for solving constrained multicriteria optimization problems with guaranteed accuracy // Doklady Mathematics. – Springer US, 2013. – Т. 88. – No. 2. – P. 559–561.
- 7 **Evtushenko, Y. G., Posypkin, M. A.** Nonuniform covering method as applied to multicriteria optimization problems with guaranteed accuracy // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2013. – Т. 53. – No. 2. – P. 144.
- 8 ТЮБЕ – The Software Quality Company / ТЮБЕ index for April 2020. [Электронный ресурс] Режим доступа URL: <https://www.tiobe.com/tiobe-index/> (Дата обращения: 15.02.2020).
- 9 **Алефельд, Г., Херибергер, Ю.** Введение в интервальные вычисления. – М. : Мир, 1987.
- 10 **Макаров, И. М.** Робототехника. История и перспективы / И. М. Макаров, Ю. И. Топчеев. – М. : Наука, МАИ, 2015. – 352 с.
- 11 **Jha, R., Chablat, D., Rouillier, F., Moroz, G.** Workspace and Singularity analysis of a Delta like family robot in Robotics and Mechatronics. – Springer International Publishing. – 2016. – 121–130 p.
- 12 **Крейг, Д.** Введение в робототехнику. Механика и управление / Джон Крейг. – М. : Институт компьютерных исследований, 2013. – 564 с.

References

- 1 **Keisner, A., Raffo, J., Wunsch-Vincent, S.** Robotics : Breakthrough Technologies, Innovation, Intellectual Property. In Foresight and STI Governance. – 2016. – Vol. 10. – No 2. – P. 7–27.
- 2 Official'nyj sajt prezidenta respubliky Kazahstan. Poslanie Prezidenta Respubliki Kazahstan N.Nazarbaeva narodu Kazahstana. 17 yanvaryya 2014 g. [Official site of the President of the Republic of Kazakhstan./Message from the President of the Republic of Kazakhstan Nursultan Nazarbayev to the people of Kazakhstan.] [Electronic resource]. – URL: https://www.akorda.kz/ru/addresses/addresses_of_president/poslanie-prezidenta-respubliki-kazahstan-nnazarbaeva-narodu-kazahstana-17-yanvaryya-2014-g

- 3 **Merlet, J. P.** Parallel robots. – Springer Science & Business Media, 2006. – Т. 128.
- 4 **Bajo, A., Simaan, N.** Kinematics-Based Detection and Localization of Contacts Along Multisegment Continuum Robots. IEEE Transactions on Robotics. In TRob. – 2012.
- 5 **Evtushenko, Y. G., Posypkin, M. A.** Nonuniform covering method as applied to multicriteria optimization problems with guaranteed accuracy In Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2013. – Т. 53. – No 2. – P. 144.
- 6 **Posypkin, M. A.** Method for solving constrained multicriteria optimization problems with guaranteed accuracy //Doklady Mathematics. – Springer US, 2013. – Т. 88. – №. 2. – P. 559–561.
- 7 **Evtushenko, Y. G., Posypkin, M. A.** Nonuniform covering method as applied to multicriteria optimization problems with guaranteed accuracy In Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2013. – Т. 53. – No 2. – P. 144.
- 8 TIOBE – The Software Quality Company. In TIOBE index for April 2020. [Electronic resource]. – URL: <https://www.tiobe.com/tiobe-index/> (Access date: 15.02.2020)
- 9 **Alefeld, G., Herzberger, YU.** Vvedenie v interval'nye vychisleniya. [Introduction to interval calculations.] – Moscow : Mir, 1987.
- 10 **Makarov, I. M.** Robototekhnika. Istoriya i perspektivy [Robotics. History and Prospects] In I. M. Makarov, Yu. I. Topcheev. (eds.)] – Moscow : Nauka, MAI, 2015. – 352 p.
- 11 **Jha, R., Chablat, D., Rouillier, F., Moroz, G.** Workspace and Singularity analysis of a Delta like family robot in Robotics and Mechatronics. – Springer International Publishing. – 2016. –121–130 p.
- 12 **Craig, D.** Vvedenie v robototekhniku. Mekhanika i upravlenie [Introduction to Robotics. Mechanics and control] In D. Craig (eds.) – Moscow : Institut komp'yuternyh issledovaniy, 2013. – 564 p.

Материал поступил в редакцию 30.09.20.

*К. И. Танырбергенава, Т. Мирғалиқызы***Робот-манипулятордың жұмыс аймағының аппроксимациялауда интервалдық талдау әдістерін қолдану**

Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қ.
Материал 30.09.20 баспаға түсті.

*К. I. Tanyrbergenova, T. Mirgalikyu***Usage of interval analysis methods in task of robot-manipulator workspace approximation**

L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan.
Material received on 30.09.20.

Мақалада робот-манипулятор «екі сілтемелік» түріндегі жұмыс аймақтары қарастырылады. Жұмыстың мақсаты – Python бағдарламалау тілі мен құралдарының мүмкіндіктерін қолдана отырып, нәтижелерді модельдеу және талдау, интервалдық талдау әдістерін пайдаланып робот-манипулятордың жұмыс аймағын аппроксимациялау алгоритмін жасау. Берілген шектеулерді ескере отырып робот-манипулятордың жұмыс аймағын зерттеу жүргізілді, есептеулерде интервалдық талдау әдістері қолданылды, бұл нәтижелерді дөңгелектеу кезінде дәлсіздіктерге жол бермеуге мүмкіндік берді. Python бағдарламалау тілінің құралдары мен аралық арифметика (талдау) әдістерінің көмегімен алгоритм жасалды. Нәтижелер визуалды түрде ұсынылды. Алынған нәтижелер белгілі бір жұмыс бетінде қозғалу кезінде роботты-манипулятордың жұмыс құралын жақсарту, нақтылау және оңтайландыру үшін практикалық мақсаттарда қолданыла алады.

Кілтті сөздер: робот манипуляторы, роботтың жұмыс аймағы, робот кинематикасы, тікелей кинематика мәселесі, интервалдық арифметика, интервалды талдау, робототехника, Python.

The article deals with the working space of the «twolink» typed robot-manipulator. The purpose of the work is to develop an algorithm for approximating the workspace of the robot-manipulator using methods of interval analysis, modeling and analysis of the results obtained using the capabilities of the programming language and tools Python. The research

of the robot-manipulator working area was carried out taking into account the imposed limitations, the methods of interval analysis were used in the calculations, which allowed avoiding the inaccuracy in rounding the results. The algorithm with use of means of programming language Python and methods of interval arithmetic (analysis) has been developed. The obtained results are presented in visual form. The results can be used for practical purposes to improve, clarify and optimize the work of the robot-manipulator working tool when moving on a given working surface.

Keywords: robot manipulator, robot workspace, robot kinematics, direct kinematics problem, interval arithmetic, interval analysis, robotics, Python.

Теруге 30.09.2020 ж. жіберілді. Басуға 14.10.2020 ж. қол қойылды.
Электронды баспа
2,99 Мб RAM
Шартты баспа табағы 23,30. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: А. Елемесқызы
Корректор: А. Р. Омарова
Тапсырыс № 3707

Сдано в набор 30.09.2020 г. Подписано в печать 14.10.2020 г.
Электронное издание
2,99 Мб RAM
Усл. печ. л. 23,30. Тираж 300 экз. Цена договорная.
Компьютерная верстка: А. Елемесқызы
Корректор: А. Р. Омарова
Заказ № 3707

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
«Торайғыров университет»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
«Торайғыров университет»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
8 (7182) 67-36-69
e-mail: kereku@tou.edu.kz
www.vestnik.tou.edu.kz