

К.И. Танырбергенова, Т.Мирғалиқызы
Факультет информационных технологий
Евразийского национального университета
имени Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан
(E-mail: kamila.tanyrbergen@gmail.com, m_t85@mail.ru)

Разработка алгоритмов аппроксимации рабочей области робота- многозвенника

Аннотация. В статье рассматривается рабочая область робота-манипулятора типа «многозвенник». Цель исследования состоит в реализации алгоритма аппроксимации рабочей области робота с применением двух методов: методом циклического перебора параметров и методом интервального анализа. Также задачами являлись моделирование полученных результатов с использованием возможностей языка программирования и инструментария Python, дальнейший анализ и сравнение результатов примененных методов. Выполнено исследование рабочей области робота-многозвенника, учтены налагаемые ограничения, что имеет важное значение для конечного результата. Проведено сравнение методов и выделены (определены) преимущества/недостатки каждого метода (в частности, какой метод позволяет в большей степени избежать неточности результатов). Был разработан алгоритм с использованием средств и возможностей языка программирования Python. Полученные результаты представлены в визуальной форме. Результаты могут быть использованы в практических целях для оптимизации работы рабочего инструмента робота-многозвенника при перемещении на отведенной рабочей поверхности.

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

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-68-36-2020-133-4-16-27>

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.

Преимущественная часть робототехнических комплексов сосредоточена в США, Японии и Европе (Германия, Франция и Великобритания). Очень стремительно развивается данная стезя в Корею и Китае. 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 генной инженерии [2].

Перечислим следующие исследовательские группы, занимающиеся тематикой, близкой к теме исследования [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).

Постановка проблемы. Объектом исследования являются методы аппроксимации рабочей области робота-манипулятора типа «многозвенник», в данном конкретном случае

возьмем робот, состоящий из двух звеньев. Проблематика исследования состоит в том, что задача оценивания перемещений рабочего устройства робота в конкретную нужную точку на координатной плоскости невозможна без наличия сколько-нибудь приближенной информации о его рабочей области. Целью исследования являются разработка и реализация методов аппроксимации рабочей области робота с предопределенной точностью (метод циклического перебора параметров и метод интервального анализа) с учетом различных ограничений. Задачами являлись моделирование полученных результатов с использованием возможностей языка программирования и инструментария Python, дальнейший анализ и сравнение результатов примененных методов.

Также были изучены и рассмотрены доступные сторонние алгоритмы аппроксимации рабочей области для разных моделей роботов, такие как метод неравномерных покрытий, предложенный Евтушенко Ю.Г., метод Кравчика [5, 6].

Разберем схематическое устройство нашего робота. Имеется манипулятор робота с двумя сегментами и двумя шарнирами, изображенный на рисунке 1.

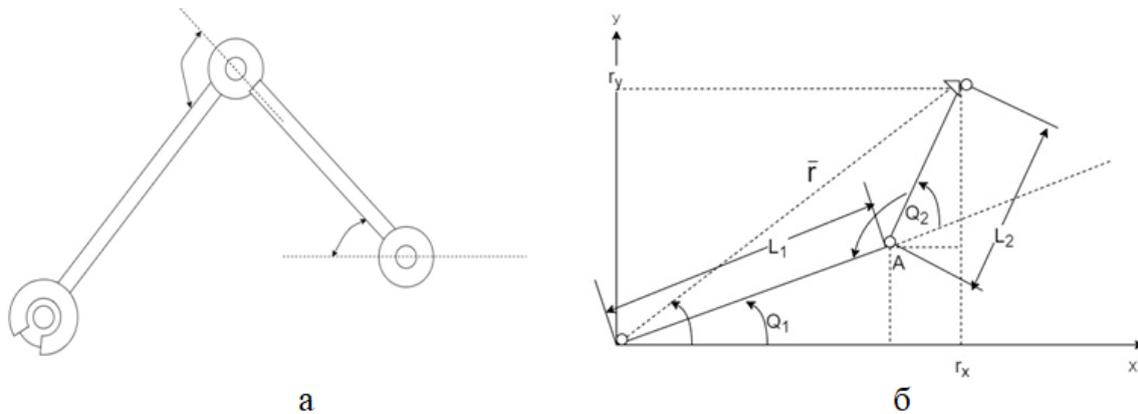


Рисунок 1 – Робот-манипулятор с двумя сегментами и двумя шарнирами, а) модель робота б) схема робота с обозначениями

На свободном конце манипулятора находится звено, которое определяет рабочий инструмент, расположением в пространстве которого необходимо управлять, то есть передвигать в нужную нам точку координат. Отметим, что мы не имеем непосредственной возможности контролировать позицию рабочего звена и способны только поворачивать двигатели, на месте которых выступают шарниры. Задача инверсной кинематики заключается в нахождении наилучшего способа поворота соединений для перемещения конечного звена в нужную позицию.

Введем обозначение \vec{r} - радиус-вектора (смотрите рисунок 1, б), 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 системе уравнений (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 системе уравнений и ограничений (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), xm, XM, ym, YM - 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 сегмента в локальной системе координат.

Рассмотрим алгоритм и результаты его работы, выполненные методом циклического перебора параметров и методом интервального анализа в отдельности.

Решение методом циклического перебора параметров. В алгоритме используются решение прямой задачи кинематики робота манипулятора и широко известный алгоритм построения бинарного дерева

Предложенный алгоритм аппроксимации рабочей области робота с использованием методов циклического перебора параметров заключается в следующем: формируется область определения функции согласно имеющимся ограничениям. Далее проводится несколько циклических проходов по системе уравнений с использованием алгоритма бинарного дерева с учетом заданной точности ϵ , решается прямая задача кинематики и выводится диапазон допустимых значений. Диапазон допустимых значений выводится на выделенной поверхности, формируя рабочую область робота. Блок-схема реализованного алгоритма представлена на рисунке 2

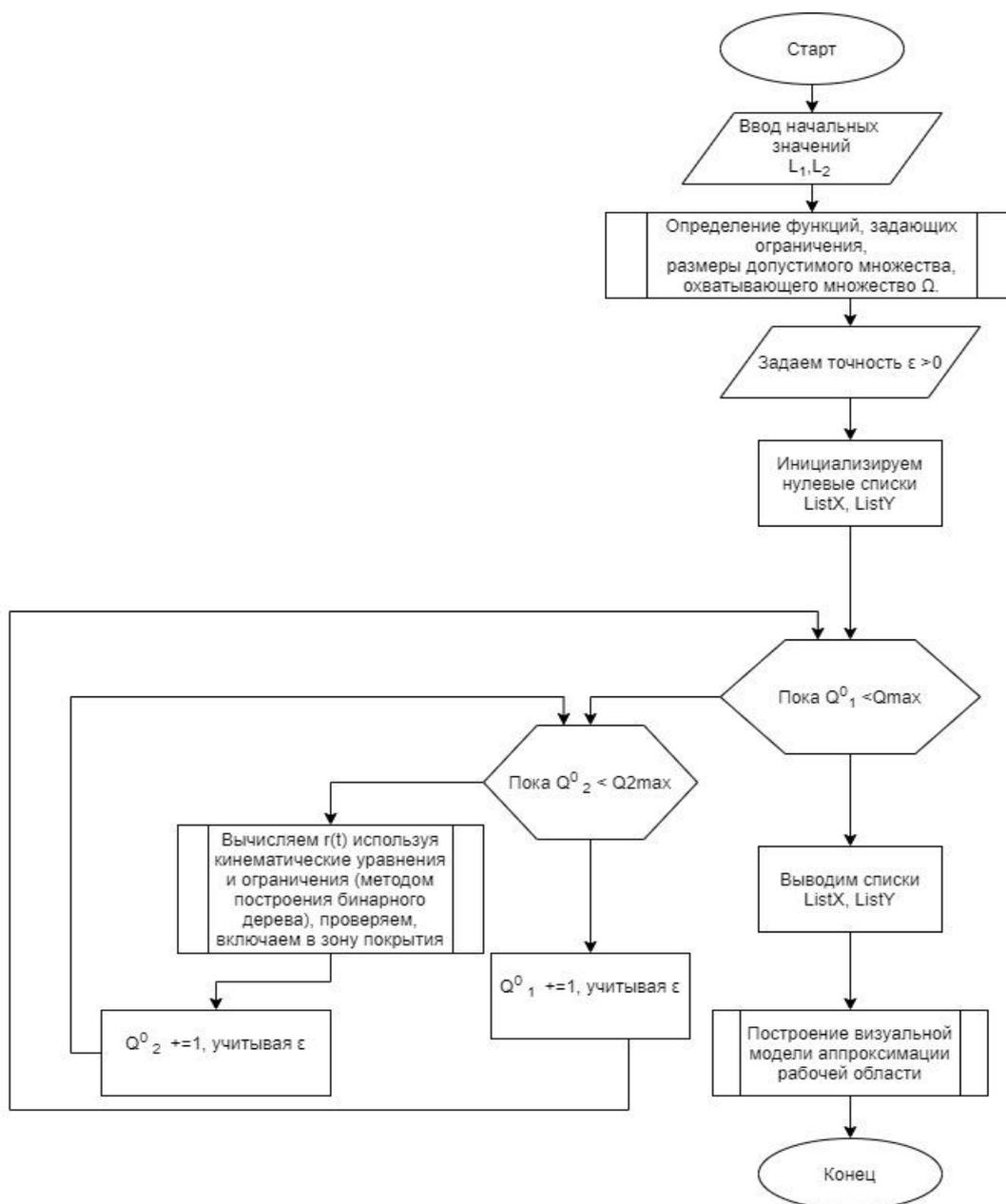


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма аппроксимации рабочей области, реализованная методом циклического перебора параметров

Результат работы алгоритма аппроксимации рабочей области с применением метода циклического перебора параметров, заданной точностью $\epsilon=5$ и с начальными данными $L1=30$, $L2=20$ на рисунке 3.

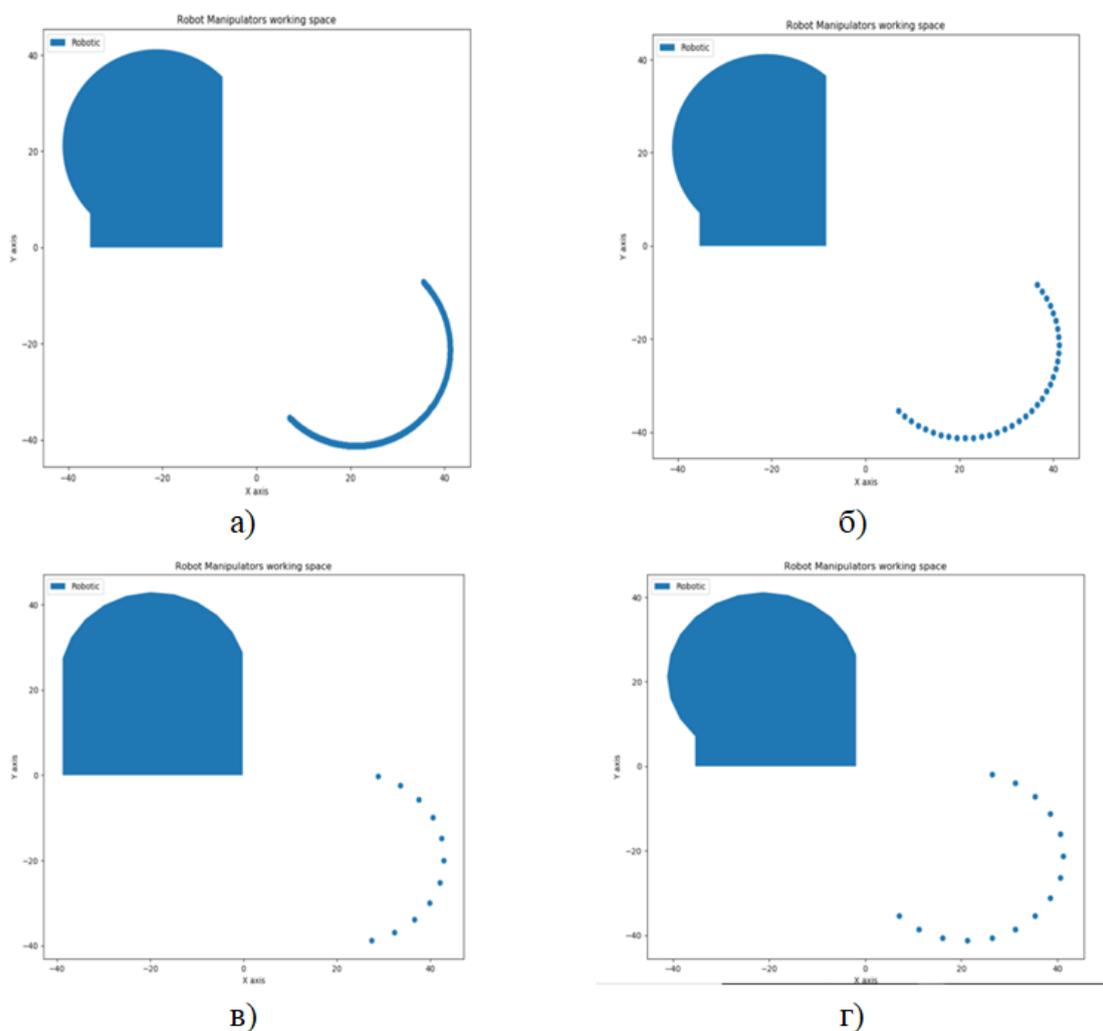


Рисунок 3 –Аппроксимация рабочей области с заданной точностью $\epsilon=5$,
а) ограничения $[-\pi, \pi]$, б) ограничения $[-\pi/2, \pi]$,
в) ограничения $[-\pi/4, \pi/2]$, г) ограничения $[-\pi/2, \pi/2]$

Решение методом интервального анализа. В данном методе также был использован алгоритм решения прямой задачи кинематики, для робота манипулятора типа «многозвенник» был применен интервальный анализ. Интервальный анализ - это обширная область знаний. Основные правила, методы и операции интервального анализа для алгоритма взяты из [7] и не описаны в статье из-за их объемности, а также в связи тем, что они детально описаны в источнике.

Блок-схема алгоритма работы программы приведена ниже, на рисунке 4.

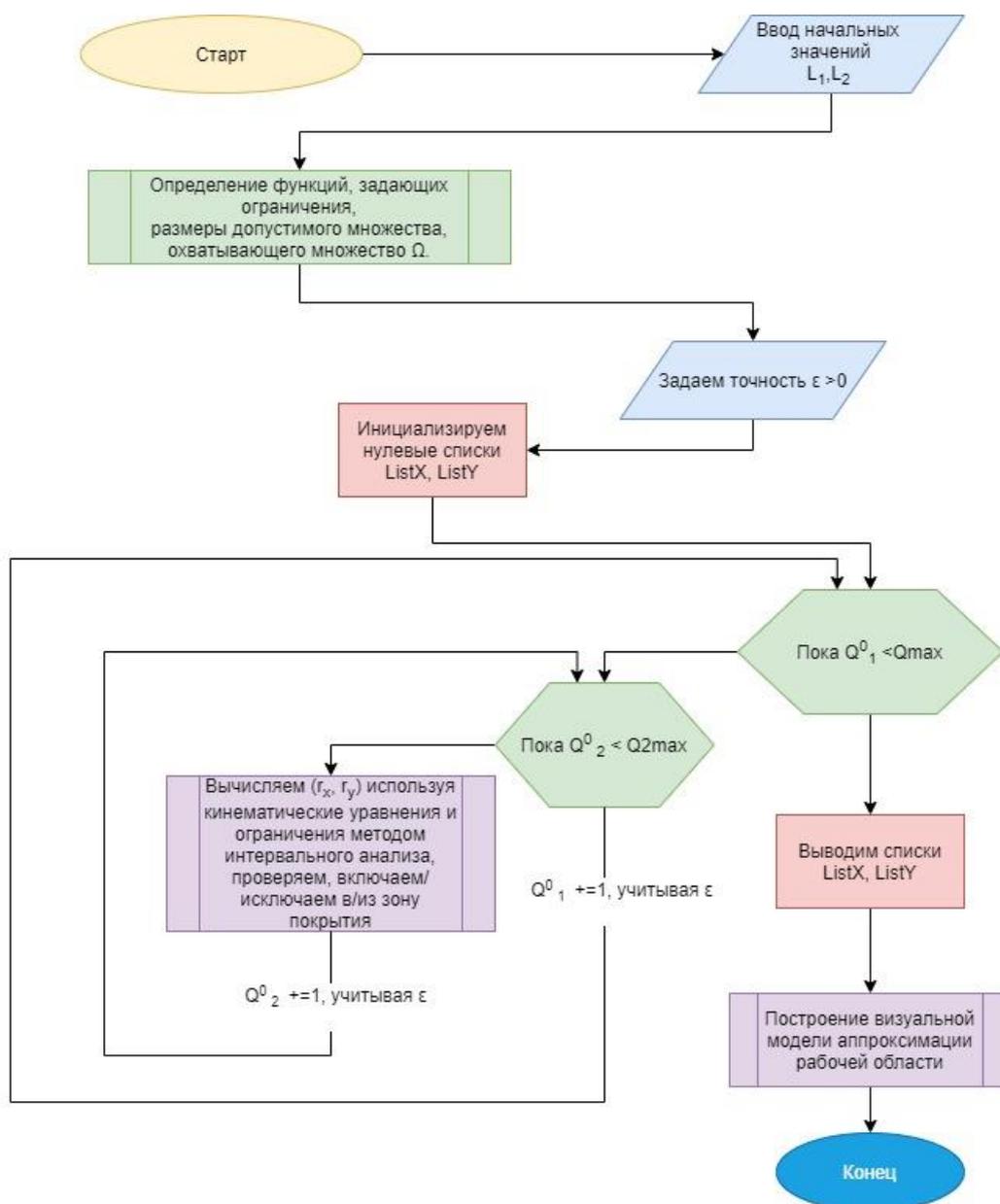


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма работы программы методом интервального анализа

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 из области определения функции получены путем деления начальной области на сетки размерами 10×10 , 100×100 и т.д. с учетом ограничений. Далее над интервалами из полученной сетки проводились операции: сетка проводилась через систему уравнений и ограничений по циклу аналогично методу циклического перебора параметров, с учетом заданной точности ϵ , решалась прямая задача кинематики. Отличие данного метода от предыдущего заключается в том, что не был применен алгоритм бинарного дерева и все операции проводились согласно правилам интервальной арифметики и методам интервального анализа. Далее выводился результат –

массив интервалов, представляющих собой аналог области допустимых значений. Далее диапазон допустимых значений выводился на выделенной поверхности, формируя рабочую область работа.

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 5.

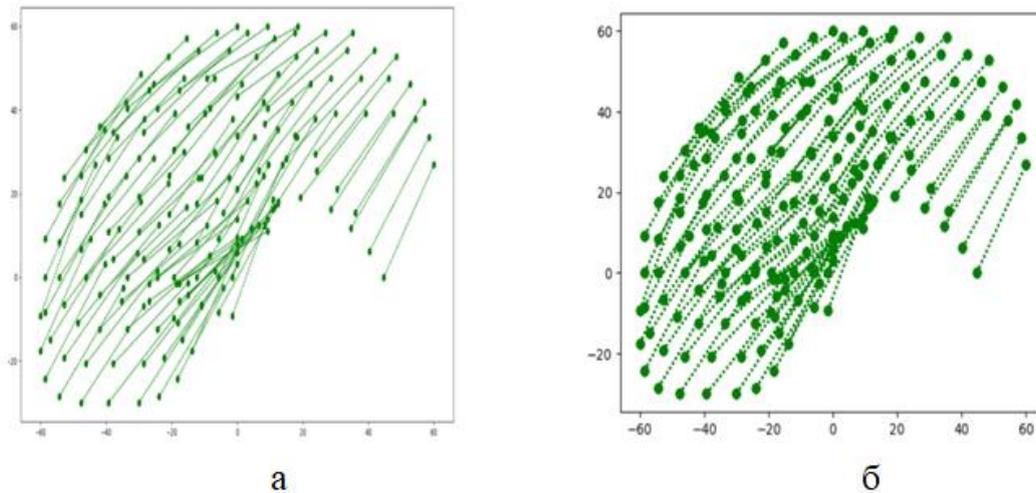


Рисунок 5 – Аппроксимация рабочей области с заданной точностью (сетка 10 на 10) а) $\epsilon=5$, б) $\epsilon=1$

Результат работы алгоритма аппроксимации рабочей области с применением интервального анализа с дифференцированными ограничениями, заданной точностью $\epsilon=5$ 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 6.

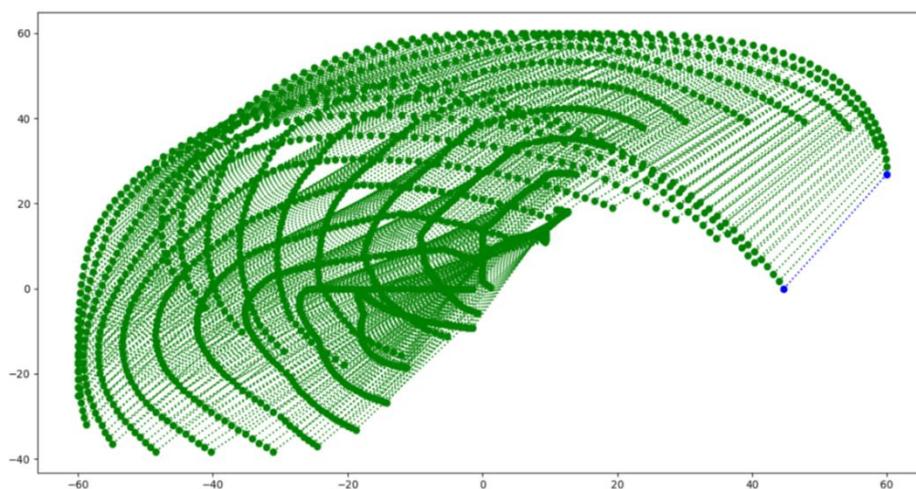


Рисунок 6 – Аппроксимация рабочей области с заданной точностью (сетка 100 на 100), $\epsilon=5$

Результат работы алгоритма аппроксимации рабочей области с применением интервального анализа с дифференцированными ограничениями, заданной точностью $\varepsilon=1$ и с начальными данными $L1=30$, $L2=20$, $Q1 \in [0, \pi]$, $Q2 \in [0, \pi]$ на примере сетки интервалов размером 100 на 100 представлен на рисунке 7.

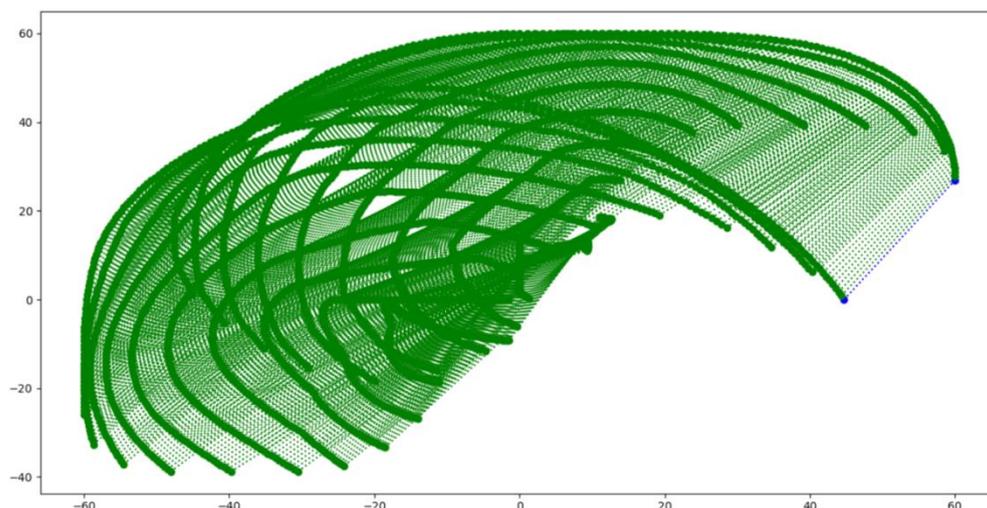


Рисунок 7 – Аппроксимация рабочей области с заданной точностью (сетка 100 на 100), $\varepsilon=1$

Программа, выполняющая задачу аппроксимации рабочей области робота-манипулятора типа «многозвенник», моделирование и анализ рабочей области робота-манипулятора реализованы на языке Python с применением двух методов: метода циклического перебора параметров и метода интервального анализа с учетом налагаемых ограничений. Python — один из самых популярных языков программирования в мире, в свежем рейтинге ТЮВЕ он занимает 3 место [8].

Среда разработки проекта: PyCharm 2019.3. Структура проекта программы изображена на рисунке 8. Для работы с графиками была использована библиотека matplotlib.

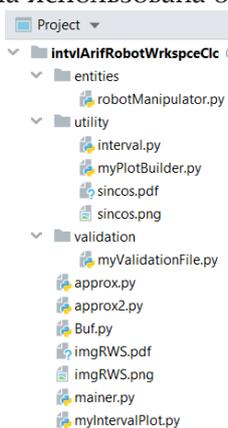


Рисунок 8 – Структура проекта

Результаты выводились в автоматически создаваемом библиотекой matplotlib окне. Также визуальный результат экспортировался в форматы «*.png» и «.pdf».

Результаты алгоритма аппроксимации методом интервального анализа с размерностью сетки 1000x1000 на сегодняшний день получены лишь в числовом формате, так как графическое представление не выведено в связи со сложностью отображения и вычисления.

При сравнении двух методов был сделан вывод, что исследование рабочей области робота-манипулятора с учетом налагаемых ограничений, в расчетах которых были использованы методы интервального анализа, имели лучший результат, так как позволили избежать неточности при округлении. Разъясним на примере: при работе алгоритма циклического перебора параметров при вычислении тригонометрических функций мы получали иррациональные числа – бесконечные непериодические дроби, которые при решении прямой задачи давали неточный результат, то есть точки координат рабочий орган мог не достигнуть из-за погрешности вычислений, лишь в 5 из 10 случаев он достигал назначения. При работе же алгоритма с использованием интервального анализа мы имели интервал из маленькой сетки, в который мы хотим переместить рабочий орган, и он в этот интервал перемещался в 9 из 10 случаев при использовании размеров сетки 10x10, 100x100, 1000x1000. Чем мельче сетка при расчетах методом интервального анализа, тем точнее результат (смотрите таблицу 1).

Таблица 1

Результаты работы алгоритма при одинаковых входных параметрах с применением разных методов

№	Входные параметры	Выходные параметры	Метод
1	$\varepsilon=1$ $L_1=30$ $L_2=20$ $Q_1=60$ $Q_2=50$	$r_x = 8.1596$ $r_y = 44.7746$	Метод циклического перебора параметров
2	$\varepsilon=5$ $L_1=30$ $L_2=20$ $Q_1=60$ $Q_2=50$	$r_x = 8.15959713348663$ $r_y = 44.77461452925132$	Метод циклического перебора параметров
3	$\varepsilon=1$ $L_1=30$ $L_2=20$ $Q_1=[59.4, 61,2]$ $Q_2=[48.6, 50.4]$ Сетка 1000 на 1000	$r_x = [8.040942655826768,$ $9.380350163450773]$ $r_y = [43.303463052404965,$ $44.957392843952334]$	Метод интервального анализа
4	$\varepsilon=1$ $L_1=30$ $L_2=20$ $Q_1=[59.4, 61,2]$ $Q_2=[48.6, 50.4]$ Сетка 100 на 100	$r_x = [4.372900919628151,$ $11.047830348274584]$ $r_y = [36.84299168765479,$ $45.99986815213265]$	Метод интервального анализа
	$\varepsilon=5$ $L_1=30$ $L_2=20$ $Q_1=[54, 72]$ $Q_2=[36, 54]$ Сетка 10 на 10	$r_x = [6.69713382293698,$ $21.35037575706388]$ $r_y = [25.58149316214962,$ $43.19077862357725]$	Метод интервального анализа

Выводы. Была выполнена задача аппроксимации рабочей области робота-манипулятора с использованием методов циклического перебора параметров и интервального анализа с заданной точностью ε , были смоделированы положения рабочего органа, решена прямая задача кинематики робота. Результаты могут быть использованы в практических целях для улучшения, уточнения и оптимизации работы рабочего инструмента робота-манипулятора при перемещении на отведенной рабочей поверхности с учетом ограничений.

Список литературы

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. Послание Президента Республики Казахстан Н.Назарбаева народу Казахстана. 17 января 2014 г. - Официальный сайт Президента Республики Казахстан [Электрон. ресурс]. – 2014. - URL: https://www.akorda.kz/ru/addresses/addresses_of_president/poslanie-prezidenta-respubliki-kazahstan-nnazarbaeva-narodu-kazahstana-17-yanvary-a-2014-g (дата обращения 20.06.2020)
3. Merlet J. P. Parallel robots. – Springer Science & Business Media, 2006. – P. 128.
4. Bajo A., Simaan N. Kinematics-Based Detection and Localization of Contacts Along Multisegment Continuum Robots. // IEEE Transactions on Robotics.- april 2012. - Vol. 28, No. 2. - P. 291–302.
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. – №. 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. Алефельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления.– Москва: Мир, 1987.- 360 с.
8. TIOBE index for April 2020. - TIOBE – The Software Quality Company [Электрон. ресурс]. – 2020. - URL: <https://www.tiobe.com/tiobe-index/> (дата обращения: 15.04.2020)

К.И. Танырбергенова, Т. Мирғалиқызы

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

Көп буынды роботтың жұмыс аймағының аппроксимациялау алгоритмдерін жасау

Аңдатпа. Мақалада «көп буынды» робот манипуляторының жұмыс аймағы қарастырылады. Зерттеу мақсаты роботтың жұмыс аймағы екі әдісті қолдана отырып, аппроксимациялау алгоритмін жүзеге асыру болып табылады: цикл бойынша параметрлерді іздеу әдісі және интервалды талдау әдісі. Сондай-ақ, міндеттер Python бағдарламалау тілі мен құралдарының мүмкіндіктерін пайдалану арқылы алынған нәтижелерді модельдеу, қолданылған әдістердің нәтижелерін әрі қарай талдау және салыстыру болды. Көп буынды роботтың жұмыс аймағын зерттеу жүргізілді, қойылған шектеулер ескерілді, бұл қорытынды нәтиже үшін маңызды. Әдістер салыстырылып, әр әдістің артықшылықтары / кемшіліктері айқындалады (атап айтқанда, қандай нәтиже дәлсіздікке жол бермеуге мүмкіндік береді). Python бағдарламалау тілінің құралдары мен мүмкіндіктерін қолдана отырып алгоритм жасалды. Нәтижелер визуалды түрде ұсынылады. Алынған нәтижелер көп буынды роботтың жұмыс құралының белгілі бір жұмыс аймағында жылжу кезінде жұмысын оптимизациялау үшін практикалық мақсаттарда қолданыла алады.

Түйін сөздер: робот-манипуляторы, роботтың жұмыс аймағы, робот кинематикасы, кинематиканың тікелей мақсаты, интервалдық талдау, робототехника, Python.

K.I. Tanyrbergenova, T.Mirgalikyzy

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

**Developing algorithms for approximation
the workspace of a multi-link robot**

Abstract. The article deals with the working space of the "multi-linked" typed robot-manipulator. The purpose of the research is to implement an algorithm of robot working area approximation using two methods: method of cyclic parameters and method of interval analysis. The tasks are to model the results obtained using the capabilities of the programming language and tools Python, and further analysis and comparison of the results of the used methods. The study of the multi-linked robot working space has been carried out and the restrictions imposed have been considered, which is important for the result. There has been performed comparison of methods. The authors have identified advantages/ disadvantages of each method (in particular, which method allows to avoid inaccuracy of results to a greater extent). An algorithm has been developed using the tools and capabilities of the Python programming language. There are presented obtained results visually. The results can be used for practical purposes to optimize the work of the multi-linked robot tool when moving on a given working space.

Key words: Robot-manipulator, robot working space, robot kinematics, direct kinematics task, interval analysis, robotics, Python.

References

1. Keisner A., Raffo J. Wunsch-Vincent S. Robotics: Breakthrough Technologies, Innovation, Intellectual Property. Foresight and STI Governance, vol. 10, no 2, 7–27 (2016).
2. Poslanie Prezidenta Respubliki Kazahstan N.Nazarbaeva narodu Kazahstana. 17 janvarja 2014 g. - Oficial'nyj sajt prezidenta respubliki Kazahstan [Message from the President of the Republic of Kazakhstan N. Nazarbayev to the people of Kazakhstan. January 17, 2014 - Official website of the President of the Republic of Kazakhstan] [Electronic resource]. Available at: https://www.akorda.kz/ru/addresses/addresses_of_president/poslanie-prezidenta-respubliki-kazahstan-nnazarbaeva-narodu-kazahstana-17-yanvarya-2014-g (Accessed: 20.06.2020).
3. Merlet J. P. Parallel robots. (Springer Science & Business Media, 2006, 128 p.) [in English]
4. Bajo A., Simaan N. Kinematics-Based Detection and Localization of Contacts Along Multisegment Continuum Robots. IEEE Transactions on Robotics, vol. 28, no. 2, 291–302 (april 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. 53, 2, 144 (2013).
6. Posypkin M. A. Method for solving constrained multicriteria optimization problems with guaranteed accuracy. Doklady Mathematics, Springer US, 88, 2, 559-561(2013).
7. Alefel'd G., Herberger Ju. Vvedenie v interval'nye vychislenija [Introduction to interval computing] (Moskva: Mir, 1987, 360 p) [in Russian].
8. TIOBE index for April 2020. - TIOBE – The Software Quality Company [Electronic resource]. Available at: <https://www.tiobe.com/tiobe-index/> (Accessed: 15.04.2020)

Сведения об авторах:

Танырбергенова К. И. – автор для корреспонденции, докторант Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан.

Мирғалиқызы Т. – PhD, и.о. доцента кафедры «Вычислительная техника» Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан.

Tanyrbergenova K. I. – author of corresponding, Ph.D. student at L. N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Mirgalikyzy T. - Ph.D., Associate Professor of the Computer Engineering Department at the L. N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.