МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.12737/article_5bab4a2147fc30.43957017

[1]Вирабян Л.Г., аспирант,
[2]Халапян С.Ю., канд. техн. наук, доц.,
[1]Кузьмина В.С., инженер
[1]Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
[2]Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова
филиал Национального исследовательского технологического института «МИСиС»

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА ПЛАНАРНОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО РОБОТА

В статье представлен кинематический анализ движения планарного параллельного робота с помощью приложения SolidWorks Motion на основании построенной 3D модели. В ходе анализа учитывались такие элементы исследования движения как ограничения движения, свойства материала, масса, скорости и контакты компонентов. Приведены результаты моделирования движения робота. В процессе моделирования реальные движения звеньев механизма заменялись сопряжениями приложения SolidWorks Motion. В результате анализа определены максимальные перемещения звеньев, а также установлена адекватность разработанных подвижных частей и отсутствие конфликтующих связей. Получены траектории движения выходных звеньев модулей роботизированного комплекса. Проведенный анализ позволяет сделать выводы о корректности траекторий перемещения модулей для выполнения операций обработки изделий различной сложности. Рассмотрена оптимизация траектории позиционирования с использованием метрики Чебышева, позволяющая минимизировать длительность позиционирования. Рассмотрен алгоритм построения гиперповерхности ограничения, который обеспечивает необходимую для безопасного позиционирования удаленность траектории движения от границ рабочей области. Представлены результаты математического моделирования.

Ключевые слова: *роботизированный комплекс, механизм относительного манипулирования, SolidWorks Motion, кинематический анализ, траектория.*

Введение. При создании новых типов высокопроизводительного инновационного оборудования для различных применений (механической обработки, резки, сварки, сборки, окраски) возникают проблемы разработки новых схемно-технических решений их компоновок, обеспечивающих сложные виды движений выходного звена в пространстве и высокую точность позиционирования. Одним из вариантов решения этой проблемы является использование механизмов параллельной структуры [1–4].

Классические механизмы параллельной структуры с 6 степенями свободы (например, гексапод) весьма сложны в управлении. Однако существует возможность упростить задачу управления, построив механизм с 6 степенями свободы в виде соединения двух механизмов параллельной структуры с 3 степенями свободы каждый [5].

В настоящее время механизмы параллельной структуры [16] находят всё более широкое применение в промышленности. В сравнении с более распространенными последовательными аналогами параллельные роботы обладают существенным превосходством по точности позиционирования, мощности и допустимой нагрузке [6–8].

Одной из важнейших подзадач построения параллельных механизмов является определение их конструктивных характеристик (размеров неподвижного основания, подвижной платформы, диапазонов длин или углов поворота приводных звеньев) в соответствии с необходимыми размерами рабочего пространства, т.е. диапазоном изменений выходных координат.

Решение этой подзадачи рассмотрено в настоящей работе на примере планарного 3-R<u>P</u>R механизма с тремя степенями свободы (перемещение вдоль осей x и y и поворот вокруг оси z). Механизм состоит из трех кинематических цепей, содержащих одну приводную поступательную и две пассивных вращательных кинематических пары.

Плоский механизм параллельной структуры представленный на рис.1 имеет одну вращательную кинематическую пару, сопряженную с основанием, одну вращательную кинематическую

пару, сопряженную с выходной платформой, и одну промежуточную вращательную кинематическую пару. Модуль имеет перемещения вдоль горизонтальных осей x и y, а также вращение вокруг вертикальной оси z.

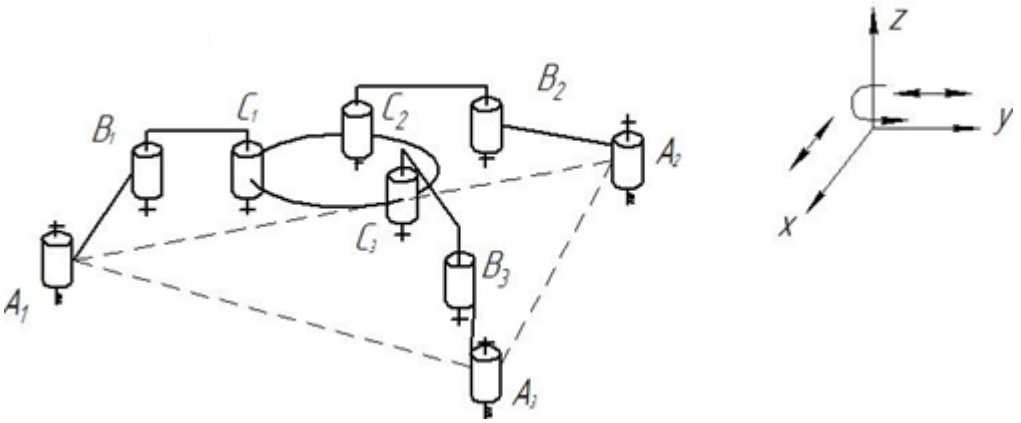

Рис. 1. Кинематическая схема роботизированного комплекса

На основе кинематической схемы для дальнейшей проработки и анализа была построена электронная модель роботизированного комплекса, для этого использована CAD система SolidWorks, позволяющая за короткие сроки получить точный электронный макет изделия и подготовить его для дальнейших исследований в математических пакетах или кинематическом анализе. Используя CAD систему Solidworks удалось построить все узлы и механизмы комплекса и проверить их на наличие ошибок и пересечений.

На рис. 2 представлена 3D модель робота. Модель представлена без крепежных изделий, это сделано для упрощения сборки и дальнейшего проведения кинематического анализа. Крепежные изделия заменены сопряжениями, обеспечивающими все основные перемещения узлов модуля.

Робот состоит из основания 1, вилки 2, тяги 3, плеча 4 и платформы 5. Основание 1 (рис. 3) обеспечивает позиционирование платформы, точкой отсчета координат являет центр описанной окружности. Вилка 2 зафиксирована на основании 1 модуля и шарнирно связана с плечом 4, сервопривод 6 необходим для обеспечения точности движения. Платформа 1 служит для закрепления (фиксации) обрабатываемой детали.

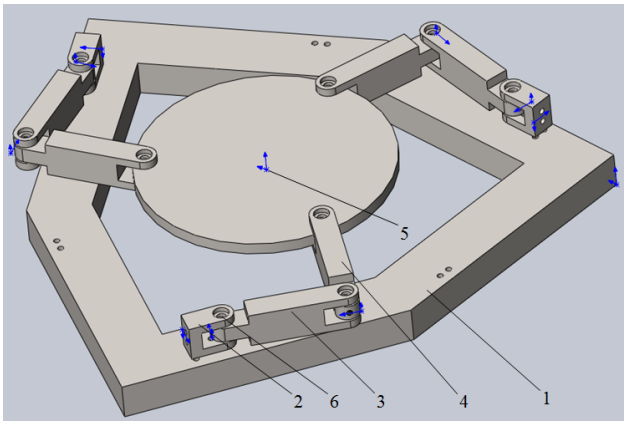

Рис. 2. 3D-модель робота:
1 – основание; 2 – вилка; 3 – плечо; 4 – тяга; 5 – диск; 6 – сервопривод

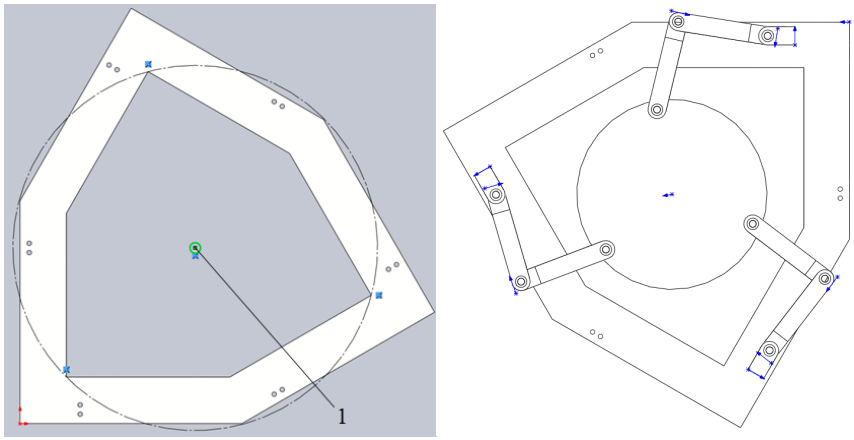

Рис. 3. Основание: 1 – центр описанной окружности

Полученная модель показала наличие всех необходимых степеней свободы, а анализ наличия зазоров и пересечений позволил устранить все недочеты конструкции на этапе проектирования. Таким образом, при изготовлении и сборке натурального макета удастся избежать неточностей и ошибок, тем самым снизятся затраты на материалы и время на сборку и подготовку изделия. Электронная модель робота так же может быть в дальнейшем использована для проведения инженерных расчетов и математического анализа характера движения рабочего органа. В ходе дальнейших исследований на основе электронной модели будет проведен кинематический анализ подвижных частей робота, а также оценка характера их движения, траектории, скорости и ускорения любой точки подвижного звена.

Проведем кинематический анализ построенной 3D-модели в SOLIDWORKS Motion, задавая для подвижных элементов модулей связи и условия, приближенные к реальным условиям эксплуатации. Процедура анализа движения позволяет учитывать физику движения сборки.

При исследовании движения используются такие элементы и параметры анализа как: ограничения движения, свойства материала, масса, скорости и контакты компонентов.

Модуль SOLIDWORKS Motion представляет из себя: дерево конструирования, временную шкалу, расположенную справа от дерева конструирования, элементы исследования движения (двигатель, контакт). Временная шкала отображает время и тип анимации в исследовании движения [11].

Для моделирования движения робота были использованы такие сопряжения как: совпадение и концентричность. Совпадение располагает выбранные грани, кромки и плоскости так, чтобы они лежали на одной плоскости, две вершины так, чтобы они соприкасались. Совпадение ограничивает перемещение компонентов сборки в пространстве. Концентричность обеспечивает совпадение геометрических осей двух объектов. Концентричность позволяет заменить шарнирные соединения в сборке.

Контакт предотвращает проникновение деталей друг в друга во время движения [12]. Контакт дополняет сопряжения ограничивая движение деталей.

Следующим шагом необходимо добавить двигатель. Двигатель перемещает компоненты в выбранном направлении. Для нашего исследования был выбран линейный двигатель с постоянной скоростью. Механизм нижней части соединен с рамой через звенья, которые так же в свою очередь между собой взаимодействуют через подвижную связь. В данном случае рабочая зона каждого звена ограничена максимальным углом сгиба подвижной части. Вся нижняя часть представлена рамой, платформой и подвижными звеньями и как видно на рис. 4 условно разбита на 3 симметричные части, чтобы обеспечить равномерное перемещение обрабатываемого изделия, закрепленного на подвижной платформе. Центром отсчета координат является центр описанной окружности.

Для примера приведен расчет движения от одного из двигателей. Для обеспечения движения задан двигатель для одного из подвижных звеньев для перемещения нижней платформы и определения траектории, которую описывает центральная точка платформы. При этом платформа может выполнять как вращательное, так и поступательное движение.

Результаты анализа движения представлены на рис. 4. Двигателю 1 задано вращательное движение против часовой стрелки на 40°. Траектория движения симметрична для остальных двигателей.

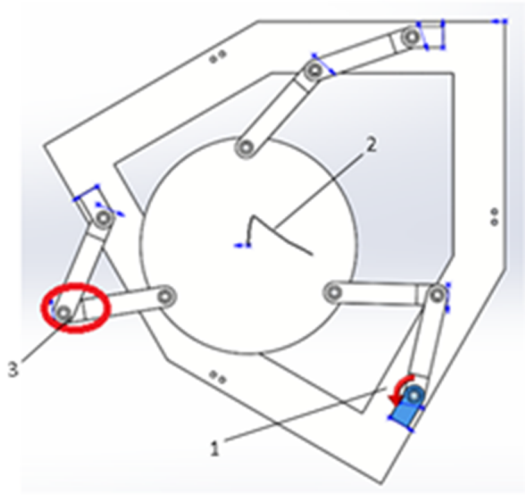

Рис. 4. Модель робота электродвигателя:
1 – двигатель; 2 – траектория движения центра нижнего модуля; 3 – зона контакта

В результате моделирования получена траектория движения выходного звена робота (рис. 5).

Оптимизация траектории должна проводиться при ограничениях на размеры рабочего пространства и (при необходимости) обрабатываемого изделия [9–10].

Вначале необходимо построить гиперповерхность ограничений, которая обеспечивает необходимую для безопасного позиционирования удаленность траектории движения от поверхности обрабатываемого изделия и границ рабочего пространства механизма (см. алгоритм на рис. 6).

В качестве исходных данных для построения гиперповерхности ограничений используется би-

нарная матрица A, с помощью которой описывается форма обрабатываемой детали. В цикле по каждой из входных координат механизма (L1, L2, L3) на основе нейросетевых функций [13], обеспечивающих решение прямой задачи кинематического анализа, определяются соответствующие значения выходных координат (x, y, φ).

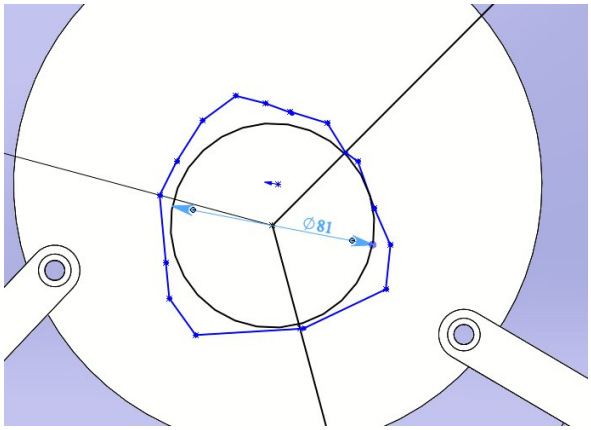

Рис. 5. Траектория движения выходного звена модуля для установки детали.

Затем осуществляется проверка неравенства нулю (и знакопостоянства) Якобиана [14]. При этом необходимый запас, удаленность системы от точек сингулярности обеспечивается величиной Jmin. В случае, если выполняется условие J(x, y, φ) < Jmin, в массив рабочего пространства B заносится значение 1 (точка запрещена) и итерация цикла завершается.

В противном случае производится поиск запрещенных точек в матрице A, удаленных от текущей точки на расстояние, не больше заданного. Если такая запрещенная точка будет найдена, в массив B заносится значение 1 и итерация цикла завершается. Таким образом, имеющиеся ограничения переносятся во входные координаты.

В случае если в результате обработки не происходит существенных изменений линейных размеров детали, описанный алгоритм может быть выполнен однократно. Если же такие изменения происходят, для уменьшения длительности позиционирования может быть рекомендована дополнительная коррекция массива B соответствии с изменением матрицы A.

Позиционирование (за исключением первоначального) выполняется по окончании очередного этапа обработки изделия (рабочего перемещения) и начинается из некоторой разрешенной точки C_0, в которую непосредственно от поверхности детали отводится инструмент. Аналогично закончиться позиционирование (за исключением финального) должно в некоторой разрешенной точке C_K, из которой предполагается осуществлять подвод инструмента к поверхности обрабатываемого изделия.

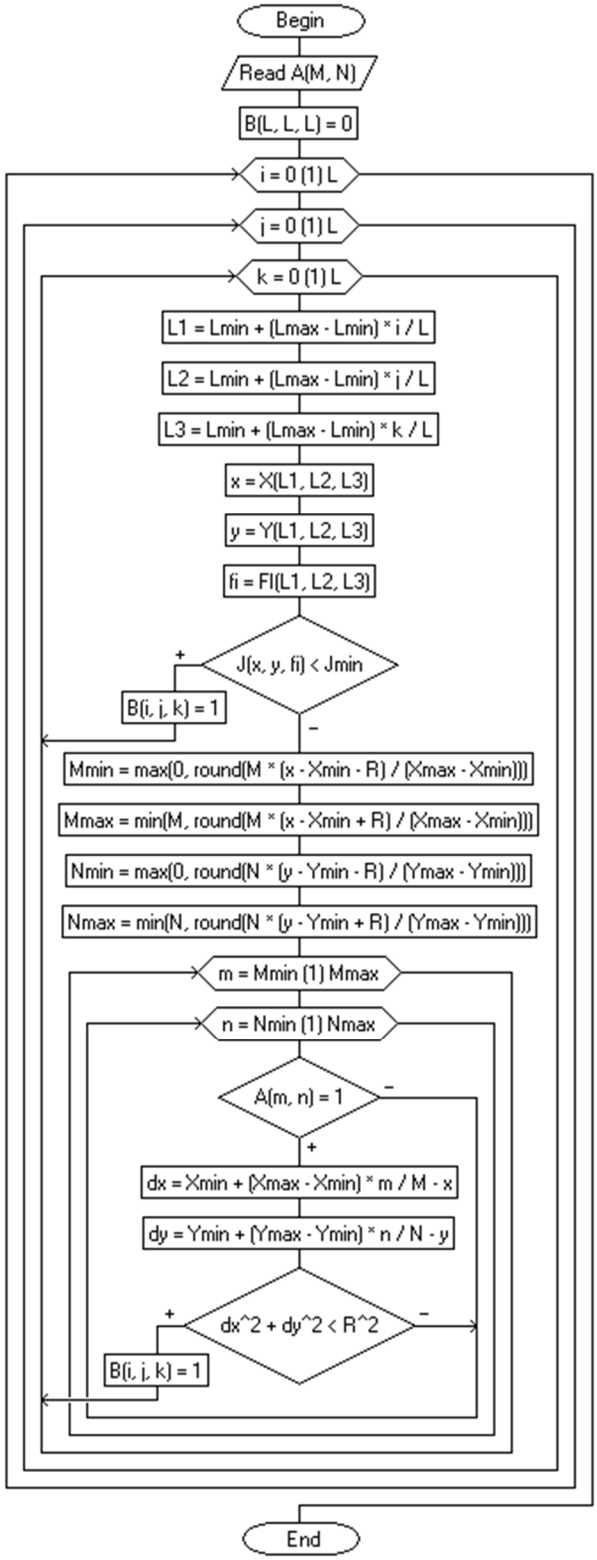

Рис. 6. Алгоритм построения гиперповерхности ограничений

Остальные точки траектории C_1 … C_{K-1} должны быть выбраны в результате ее оптимизации. Исходное семейство случайных траекторий, каждая из которых представляет собой совокуп-

ность последовательных прямолинейных перемещений (шагов) из точки C_i в точку C_{i+1} и обеспечивает безопасный (с учетом ограничений) перевод механизма из точки C_0 в точку C_K, может быть построено любым из перечисленных выше способов.

К каждой из этих траекторий может быть применен алгоритм дискретной локальной оптимизации [15], который сводится к последовательному уменьшению длины шагов в результате многократного переноса отдельных точек. Данная методика разработана для уменьшения суммарной длины траектории, но, как нетрудно показать, ее использование не приведет к увеличению длительности позиционирования, поэтому предложенная выше целевая функция в результате такой оптимизации может быть уменьшена.

Использованная модификация метода, пригодная к применению для оптимизации траектории позиционирования.

Проиллюстрируем предлагаемую методику на примере изменения длин двух звеньев (двумерная задача).

В результате применения дискретной локальной оптимизации исходное семейство случайных траекторий – красная, зеленая и коричневая линии на рис. 7 (величина шага сильно преувеличена) – будет сведено к двум маршрутам – красная и зеленая линии. При этом очевидно, что их длина одинакова, однако, как показывает расчет, позиционирование по зеленой траектории занимает на 8,5 % больше времени.

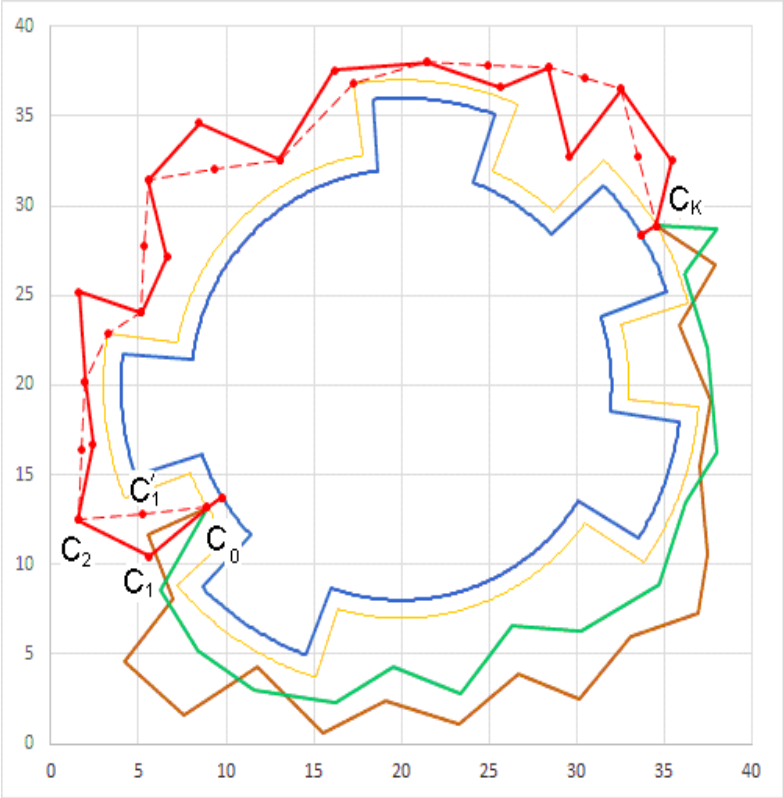

Рис. 7. Семейство траекторий позиционирования и их оптимизация (величина шага сильно преувеличена)

Заключение. Представленные возможности применения кинематического анализа с использованием SOLIDWORKS Motion позволяют получить результаты, которые могут быть применены при проектировании подобных конструкций и упростить дальнейшие исследования в данной области. Применение предложенной методики переноса имеющихся ограничений в пространство входных координат робота-станка параллельной структуры и использование в качестве целевой функции модифицированной метрики Чебышева позволяют проводить оптимизацию времени позиционирования рабочего инструмента и, в конечном итоге, снизить общую длительность обработки изделия.

Источник финансирования. *РНФ, грант № 16-19-00148.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Glazunov V.A., Koliskor A.S., Krainev A.F., 1991. The Spatial Mechanisms with Parallel Structure. M .: Nauka, pp. 95.

2. Rybak L.A., Chichvarin A.V., Mamaev Y.A., Gaponenko E.V. Synthesis of Control System of Single- and a Two-Section Manipulators with Parallel

Kinematics // Fundamental Problems of Engineering and Technology. 2012, (2-6). Pp. 60-68.

3. Rybak L.A., Gaponenko E.V., Mamaev Y.A., New Technologies of High-Speed Mechanical Processing on Machine Tools with Parallel Kinematics // Fundamental Problems of Engineering and Technology, 2012, (6): www.science-education.ru/106-7430.

4. Merlet J.P., Force-Feedback Control of Parallel Manipulators // Proc. IEEE Intern. Conf. Robot, and Automat., Philadelphia. Wash. 1988. vol. 3. Pp. 1484–1989.

5. Rybak L.A., Gosselin C., Chichvarin A.V., Grinek A.V. The method of structural synthesis of parallel mechanisms with the set of the trajectory of output link on the plane // Advances in Environmental Biology. 2014. №8 (4). Pp. 855-861.

6. Рыбак Л.А., Гапоненко Е.В., Мамаев Ю.А. Новые технологии высокоскоростной механической обработки на станках с параллельной кинематикой // Современные проблемы науки и образования. 2012. №6. С. 21.

7. Рыбак Л.А., Чичварин А.В., Мамаев Ю.А., Гапоненко Е.В. Синтез системы управления одно- и двухсекционного манипуляторов с параллельной кинематикой // Фундаментальные проблемы техники и технологии. 2012. №2-6. С. 60.

8. Rybak L.A., Gaponenko E.V., Chichvarin A.V. Determination of Static Error of the Machine with Parallel Kinematic // World Applied Sciences Journal. 2014. №30 (9). Pp. 1193–1198.

9. Rybak L.A., Gaponenko E.V., Mamaev Y.A. Algorithm for correcting the trajectory of the working body of the parallel robot based on special provisions // World Applied Sciences Journal. 2015. №25 (9). Pp. 824-834.

10. Rybak L.A., Chichvarin A.V., Duyun T.A. Synthesis of Optimal Superstability-Based Controller for Active Vibroprotection Systems with Electromechanical and Electrohydraulic Actuators // Advances in Environmental Biology. 2014. №8 (4). Pp. 844–854.

11. Howard W., Musto J. Introduction to Solid Modeling Using SolidWorks. 2017/ McGraw-Hill Higher Education. 2017. 400 p.

12. Lee H-H. Mechanics of Materials Labs with SolidWorks Simulation. SDC Publications. 2014. 278 p.

13. Kong H., Gosselin C.M. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. Springer, 2007.

14. Rybak L.A., Khalapyan S.Y., Gaponenko E.V. Issues of planning trajectory of parallel robots taking into account zones of singularity // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 327 (2018) 042092.

15. Корытов М.С., Щербаков В.С. Алгоритм дискретной локальной оптимизации траектории перемещения объекта в пространстве с препятствиями // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Международной научно-технической конференции. Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. С. 317–322.

16. Рыбак Л.А., Мамаев Ю.А., Малышев Д.И., Вирабян Л.Г. Программный модуль для реализации заданной траектории движения выходного звена робота-гексапода для 3D печати изделий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №8. С. 155–164.

Информация об авторах

Вирабян Лусине Гарниковна, аспирант кафедры технологии машиностроения.
E-mail: lvg181992@mail.ru
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Халапян Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент.
E-mail: rl_bgtu@intbel.ru
Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический институт» «МИСиС»).
Россия, 309516, Старый Оскол, Макаренко микрорайон, 42.

Кузьмина Виктория Сергеевна, инженер центра высоких технологий.
E-mail: rl_bgtu@intbel.ru
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в июле 2018 г.
© Вирабян Л.Г., Халапян С.Ю., Кузьмина В.С., 2018

Virabyan L.G., Khalapyan S.Y., Kuzmina V.S.

OPTIMIZATION OF THE POSITIONING TRAJECTORY OF PLANAR PARALLEL ROBOT OUTPUT LINK

The article presents a kinematic analysis of the planar parallel robot motion using the SolidWorks Motion application based on the built 3D model. Such elements of the motion investigation as movement restrictions, material properties, mass, speed and component contacts were taken into account in the course of the analysis. The results of robot motion simulation are presented. The real movements of the links of the mechanism were replaced by the interfaces of the SolidWorks Motion application during the simulation. As a result of the analysis, the maximum movements of the links are determined, and the adequacy of the developed moving parts and the absence of conflicting links are established. Trajectories of the output links of the robotic complex modules are obtained. The analysis allows us to draw conclusions about the correctness of the trajectories of the modules displacement for performing products processing operations of varying complexity. The optimization of the positioning path using the Chebyshev metric is considered, which allows to minimize the length of positioning. An algorithm for constructing a hypersurface of a constraint is considered, which provides the distance of the trajectory necessary for safe positioning from the boundaries of the working area. The results of mathematical modeling are presented.

Keywords: *robotic complex, relative manipulation mechanism, SolidWorks Motion, kinematic analysis, trajectory.*

REFERENCES

1. Glazunov V.A., Koliskor A.S., Krainev A.F., 1991. The Spatial Mechanisms with Parallel Structure. M .: Nauka, pp. 95.

2. Rybak L.A., Chichvarin A.V., Mamaev Y.A., Gaponenko E.V. Synthesis of Control System of Single- and a Two-Section Manipulators with Parallel Kinematics. Fundamental Problems of Engineering and Technology, 2012, (2-6), pp. 60–68.

3. Rybak L.A., Gaponenko E.V., Mamaev Y.A., New Technologies of High-Speed Mechanical Processing on Machine Tools with Parallel Kinematics. Fundamental Problems of Engineering and Technology, 2012, (6): www.science-education.ru/106-7430.

4. Merlet J.P., Force-Feedback Control of Parallel Manipulators. Proc. IEEE Intern. Conf. Robot, and Automat., Philadelphia. Wash, 1988, vol. 3, pp. 1484–1989.

5. Rybak L.A., Gosselin C., Chichvarin A.V., Grinek A.V. The method of structural synthesis of parallel mechanisms with the set of the trajectory of output link on the plane. Advances in Environmental Biology, 2014, no. 8 (4), pp. 855–861.

6. Rybak L.A., Gaponenko E.V., Mamaev Yu.A. New technologies of high-speed machining on machines with parallel kinematics. Modern problems of science and education, 2012, no. 6, p. 21.

7. Rybak L.A., Chichvarin A.V., Mamaev Y.A., Gaponenko, E. V. Synthesis of control systems with one – and two-piece manipulators with parallel kinematics. Fundamental problems of technics and technology, 2012, no. 2–6, pp. 60.

8. Rybak L.A., Gaponenko E.V., Chichvarin A.V. Determination of Static Error of the Machine with Parallel Kinematic. World Applied Sciences Journal, 2014, no. 30 (9), pp. 1193–1198.

9. Rybak L.A., Gaponenko E.V., Mamaev Y.A. Algorithm for correcting the trajectory of the working body of the parallel robot based on special provisions. World Applied Sciences Journal, 2015, no. 25 (9), pp. 824–834.

10. Rybak L.A., Chichvarin A.V., Duyun T.A. Synthesis of Optimal Superstability-Based Controller for Active Vibroprotection Systems with Electromechanical and Electrohydraulic Actuators. Advances in Environmental Biology, 2014, no. 8 (4), pp. 844–854.

11. Howard W., Musto J. Introduction to Solid Modeling Using SolidWorks. 2017/ McGraw-Hill Higher Education, 2017, 400 p.

12. Lee H-H. Mechanics of Materials Labs with SolidWorks Simulation. SDC Publications, 2014, 278 p.

13. Kong, H., Gosselin C.M. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. Springer, 2007.

14. Rybak L.A., Khalapyan S.Y., Gaponenko E.V. Issues of planning trajectory of parallel robots taking into account zones of singularity. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 327 (2018) 042092.

15. Korytov M.S., Shcherbakov V.S. Algorithm of discrete local optimization of the object trajectory in space with obstacles. Transport and transport-technological systems: proceedings of the International scientific and technical conference. Tyumen: TSOGU, 2011, pp. 317–322.

16. Rybak L.A., Mamaev Y.A., Malyshev D.I., Virabyan L.G. Software module for implementing a predetermined path of movement of the output link of the robot hexapod, for 3D printing products. Bulletin BGTU im. V. G. Shukhov, 2016, no. 8, pp. 155–164.

Information about the author
Lusine G. Virabyan, Postgraduate student.
E-mail: lvg181992@mail.ru
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sergey Y. Khalapyan, PhD, Assistant professor.
E-mail: rl_bgtu@intbel.ru
Starooskolsky Technological Institute A.A. Ugarova (a branch of National Research Technological Institute" "MISiS").
Russia, 309516, Stary Oskol, Makarenko microdistrict, 42.

Victoria S. Kuzmina, Engineer.
E-mail: rl_bgtu@intbel.ru
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in July 2018

Для цитирования:
Вирабян Л.Г., Халапян С.Ю., Кузьмина В.С. Оптимизация траектории позиционирования выходного звена планарного параллельного робота // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №9. С. 106–113. DOI: 10.12737/article_5bab4a2147fc30.43957017

For citation:
Virabyan L.G., Khalapyan S.Y., Kuzmina V.S. Optimization of the positioning trajectory of planar parallel robot output link. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no. 9, pp. 106–113. DOI: 10.12737/article_5bab4a2147fc30.43957017