

Кинематическое исследование манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода

Н.С. Воробьева

Волгоградский государственный аграрный университет, пр. Университетский 26, Волгоград, Россия

vgsxa@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9035-6382>

Статья поступила 15.10.2021, принята 9.11.2021

В результате изучения особенностей конструкций манипуляторов выявлено, что разработки манипуляторов параллельно – последовательной (гибридной) структуры широко используется в различных отраслях народного хозяйства. Использование манипуляторов данной структуры позволит учесть недостатки и совместить преимущества манипуляционных систем параллельной и последовательной структур. Перемещение рабочего органа манипулятора определяются характером выполняемой технологической операции. Анализ технологических процессов в промышленности, сельском хозяйстве и перерабатывающем производстве демонстрирует, что большую часть их можно выполнить с помощью манипуляторов гибридной структуры в виде трипода. Перемещение рабочего органа из известного положения в заданное конечное положение реализуется изменением длин исполнительных звеньев и изменением углов поворота звеньев захвата манипулятора. Рассматривается возможность кинематического исследования манипуляторов и оценка их работоспособности в зоне обслуживания. На примере манипулятора, состоящего из манипулятора трипода параллельной структуры, установленного на поворотном основании, и захвата последовательной структуры с тремя управляемыми степенями свободы проведено кинематическое исследование, рассмотрены кинематическая схема и конфигурация манипулятора. Задача о конфигурации определяется решением задачи оптимизации из условия минимума критерия обобщенной энергии, который фактически минимизирует изменения длин исполнительных звеньев в каждой точке траектории рабочего органа. В заключении приведены результаты численного моделирования, подтверждающие работоспособность предложенного алгоритма, продемонстрирована зона обслуживания манипулятора параллельно-последовательной структуры с захватом.

Ключевые слова: манипулятор-трипод, кинематика, позиционирование, зона обслуживания

Kinematics loading manipulators of the parallel- sequential structure based on a tripod

N.S. Vorob'yeva

Volgograd State Agrarian University; 26, University Ave., Volgograd, Russia

vgsxa@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9035-6382>

Received 15.10.2021, accepted 9.11.2021

As a result of studying the design features of manipulators, it is revealed that the development of manipulators in a parallel- sequential (hybrid) structure is widely used in various sectors of the national economy. The use of manipulators of this structure takes into account the disadvantages and combines the advantages of manipulation systems of parallel and sequential structures. The movement of the working body of the manipulator is determined by the nature of the technological operation being performed. Analysis of technological processes in industry, agriculture and processing industry demonstrates that most of them can be performed using manipulators of a hybrid structure in the form of a tripod. The movement of the working body from a known position in a predetermined end position is implemented by changing the length of the actuators and a change in the angles of rotation of the grip of the manipulator. The possibility of a kinematic study of manipulators and an assessment of their performance in the service area is considered. On the example of a manipulator consisting of a manipulator of a tripod of a parallel structure mounted on a rotary base and a capture of a sequential structure with three controllable degrees of freedom, a kinematic study is carried out, the kinematic diagram and configuration of the manipulator are considered. The configuration problem is determined by solving the optimization problem from the condition of the minimum criterion of the generalized energy, which actually minimizes changes in the lengths of the executive links at each point of the trajectory of the working body. In the conclusion, the results of numerical modeling are presented, confirming the performance of the proposed algorithm, and the service area of a manipulator of a parallel-sequential structure with gripping is demonstrated.

Keywords: tripod manipulator; kinematics; positioning; service area.

Введение. Для решения задач автоматизации и роботизации промышленности, сельскохозяйственного и перерабатывающего производств используются манипуляторы. Анализ исследования манипуляционных систем показал, что двумя основными видами конструкций манипуляторов являются последовательная

(Рис. 1а) и параллельная кинематические архитектуры (Рис. 1б), каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки [1, 2].

В результате изучения особенностей конструкций манипуляторов выявлено, что в последнее время широко используется разработки манипуляторов параллельно – последовательной (гибридной) структуры, это позволяет совместить преимущества манипуляционных систем параллельной и последовательной структур.



Рис. 1а. Модельный ряд промышленных манипуляторов FANUC (Япония)



Рис.1б. Робот-манипулятор (Дельта-механизм) компании Omron

Исследованиями манипуляторов данных структурных схем занимался ряд ученых, в том числе в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН получены серьезные результаты, была разработана полная классификация этих объектов, созданы методы их анализа и синтеза, исследованы динамические свойства подобных механизмов, которые нашли отражение в работах А.Ф. Крайнева, В.А. Глазунова, В.М. Базрова, А.И. Корендясева, Г.В. Рашояна, Л.А. Рыбак, Б.Л. Саламандры, Ю.А. Семенова, Л.И. Тывеса, И.И., С.В. Хейло, Филиппова Г.С. и многих др. [1, 3-6].

Но вместе с тем стоит отметить, что принципы научных и технических проблем проектирования и расчета параметров, моделирования кинематики и динамики, планирования траекторий и синте-

за алгоритмов систем управления движением манипуляторов параллельно-последовательной структуры окончательно не сформированы.

Перемещения рабочего органа манипулятора определяются характером выполняемой технологической операции. Возможность подхода рабочего органа манипуляционного механизма к предмету обслуживания с заданной ориентацией определяет работоспособность манипуляторов, поэтому в работе ставятся цель и задачи: кинематическое исследование манипуляторов параллельно-последовательной структуры и оценка их функциональных возможностей в зоне обслуживания.

Постановка задачи кинематического исследования манипуляторов. Исследования технологических процессов в различных отраслях показали, что ряд работ можно выполнить с помощью манипуляторов параллельно-последовательной структуры на базе трипода [6-8], некоторые из которых изобретены в Волгоградском ГАУ [9,10]. Манипулятор-трипод (рис.2) состоит из трех исполнительных звеньев в виде электроактуаторов с линейными приводами. С одного конца звенья 1,2,3 крепятся на поворотном треугольном основании-платформе 5, с другой стороны соединяются в одной точке и монтируются на сферическом шарнире 6, который имеет пять степеней подвижности. Данная подвижная конструкция, соединенная в одной точке, исключает появление изгибающих моментов в результате нагрузок от внешних сил, а сменные рабочие органы, которые могут использоваться, закрепляются в узле 6 и позволяют выполнять разные технологические операции. Так как звено 4 за счет линейного актуатора может изменять свою длину, то и угол поворота основания 5 также имеет переменные значения. Манипулятор (рис. 2) дополнен управляемым захватным устройством с тремя степенями свободы (рис. 3) для расширения угла сервиса.

Возможно использование исполнения манипулятора без поворотной платформы в виде неподвижного основания (рис. 4). Использование данной конструкции актуально в том случае, если требуются высокие скорости и ускорения выходного звена, например, при работе на конвейерной ленте в перерабатывающем производстве.

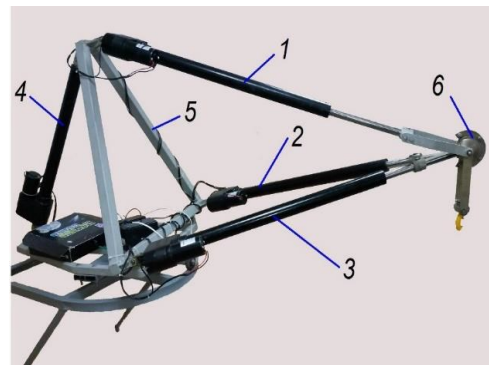


Рис. 2. Манипулятор-трипод на поворотном основании



Рис. 3. Манипулятор-трипод с трехступенным захватом



Рис.4. Манипулятор-трипод на неподвижном основании

Для совершенствования технологии и автоматизации процессов грузопереработки сельхозпродукции разработан погрузочно-транспортный агрегат с манипуляционным механизмом в виде трипода [11,12] (рис.5).



Рис. 5. Манипулятор подборщик грузов

На примере манипуляционного механизма на поворотном основании с захватом последовательной структуры (рис.3), рассмотрим кинематические схемы манипулятора (рис.6, а) и захвата (кисти) (рис.6, б). Маневренность такого манипулятора, которая определяется степенью подвижности его механизма при неподвижном

захвате, равна единице, а конкретные значения манипулятивности определяются после конструкторской проработки.

Возможно существование схемы манипулятора, в которой расстояние $(O_2O_3 = a)$ от точки подвеса до оси шарнира O_3z_3 равно нулю. В этом случае оси трех вращательных пар пересекаются в точке, и локальные движения конечной точки цепи происходят по поверхности. Однако за счет региональных движений точки подвеса, обеспечивается ее объемное движение.

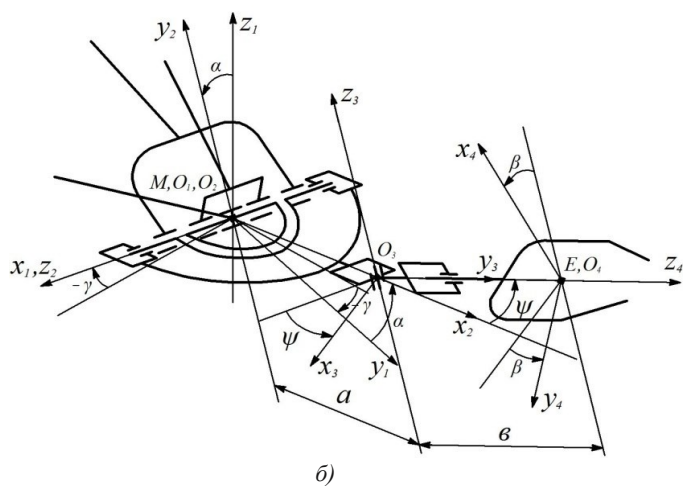
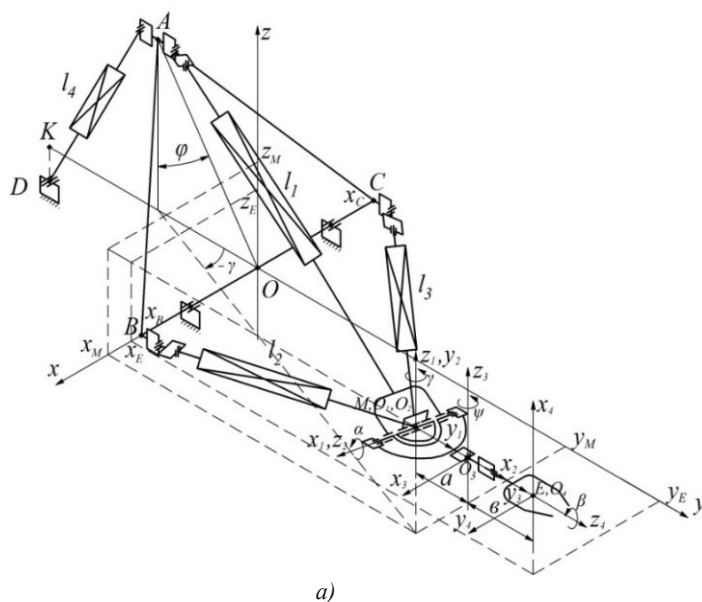


Рис. 6. Кинематические схемы: а) манипулятора – трипода, б) захват с тремя степенями подвижности

Методика кинематического исследования и оценка работоспособности манипулятора-трипода в зоне обслуживания. Например, в манипуляторе-трипode (рис. 3, рис. 6) обобщенными координатами являются длины звеньев $l_k(t)$, $k=1\div 3$ руки, угол $\varphi(t)$ наклона поворотного основания, углы относительных поворотов $\alpha(t)$, $\psi(t)$ звеньев захватного устройства, а также угол поворота кисти $\beta(t)$, пределы которых могут изменяться. Значения этих углов, определяют параметр

ры манипулятивности манипулятора и его ориентирующие возможности. Причем, в разных точках зоны обслуживания, в силу особенностей кинематической структуры манипулятора и конструктивных параметров кинематических пар, параметры манипулятивности разные.

Для определения кинематических характеристик манипулятора и захвата вводятся системы координат: одна абсолютная $Oxyz$, связанная с неподвижным основанием и четыре подвижных $O_i x_i y_i z_i$ ($i = 1, 2, \dots, 4$) по оси относительного вращения исполнительных звеньев, т.е. в общей сложности пять систем координат (рис. 6).

Задача позиционирования манипулятора состоит в определении обобщенных координат манипулятора l_k , $k=1 \div 3$ φ , α , ψ , β при заданном программном положении рабочего органа, определяемого координатами (x_E, y_E, z_E) , его центра в неподвижной системе $Oxyz$ и направляющими косинусами a_{pq} последней системы координат $O_4 x_4 y_4 z_4$ также относительно неподвижной системы координат. Для решения этой задачи необходимо решить прямую задачу для руки манипулятора, т.е. определить декартовы координаты $x_M(t)$, $y_M(t)$, $z_M(t)$ точки подвеса $M(O_1, O_2)$ в абсолютной системе отсчета $Oxyz$ (рис. 6а) и обратную задачу для захватного устройства – определение углов φ , α , ψ [13].

Конфигурация манипулятора определяется множеством значений, поэтому вводятся критерии качества управления движением руки манипулятора. Оптимизационная постановка обратной задачи о положении звеньев манипулятора позволяет разработать алгоритм, который определяет единственное решение, описывающее необходимую конфигурацию манипулятора [14–16].

Для решения поставленных задач предлагается угол φ_i поворота основания манипулятора параллельно-последовательной структуры находить из условия минимума критерия обобщенной энергии в виде квадратичной функции, таким образом, фактически данный критерий минимизирует изменение длин исполнительных звеньев.

$$\Phi(\varphi_i) = c_1 [l_{1i}(\varphi_i) - l_{10}]^2 + c_4 [l_{4i}(\varphi_i) - l_{40}]^2 \quad (1)$$

с ограничениями

$$\varphi_{\min} \leq \varphi'_i \leq \varphi_{\max}, \quad (2)$$

где $l_{1i}(\varphi_i)$, $l_{4i}(\varphi_i)$ - значения длин исполнительных звеньев-актуаторов в момент времени t_i ; c_1 , c_4 - весовые коэффициенты; φ_{\min} , φ_{\max} - минимальное и максимальное допустимые значения угла поворота основания (рис.6а); φ'_i - оптимальное значение угла поворота.

Функционал (1) позволяет достаточно легко определить обобщенные координаты манипулятора, весовые коэффициенты в его выражении c_1 , c_4 следует выбирать так, чтобы обобщенным координатам $l_1(\varphi)$, $l_4(\varphi)$, усилия в которых большие, соответствовали и большие значения весовых коэффициентов. Правиль-

ный выбор значений этих коэффициентов гарантирует адекватность полученного критерия.

В данной работе значения весовых коэффициентов приняты равными единице, так как в манипуляторе-трипode звенья l_1 и l_4 , нагружены приблизительно одинаково, это демонстрирует результат исследований [17]

Целевая функция Лагранжа имеет вид

$$\Phi^* = c_1 (l_{1i} - l_{10})^2 + c_4 (l_{4i} - l_{40})^2 + \lambda_1 (u_1^2 + \varphi_i - \varphi_{\max}) + \lambda_2 (u_2^2 + \varphi_{\min} - \varphi_i), \quad (3)$$

где u_1^2 , u_2^2 - вспомогательные переменные; λ_1 , λ_2 - множители Лагранжа.

Необходимые условия минимума функции (1) записываются в форме [18]

$$\frac{\partial \Phi^*}{\partial \varphi} = c_1 \frac{\partial (l_{1i} - l_{10})^2}{\partial \varphi} + c_4 \frac{\partial (l_{4i} - l_{40})^2}{\partial \varphi} + \lambda_1 - \lambda_2 = 0, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0 \text{ при } \varphi'_i < \varphi_{\max}; \lambda_2 = 0 \text{ при } \varphi'_i > \varphi_{\min}; \\ \lambda_1 &> 0 \text{ при } \varphi'_i = \varphi_{\max}; \lambda_2 > 0 \text{ при } \varphi'_i = \varphi_{\min}, \end{aligned} \quad (5)$$

Так как функция Лагранжа (3) выпуклая, а множители $\lambda_1 \geq 0$, $\lambda_2 \geq 0$, то необходимые условия (4), (5) являются достаточными. Конкретная форма кривой (1) зависит от координат начальной и конечной точек захвата E .

Определив из (4), (5) угол φ'_i , находим угол γ'_i . Найденное значение конструктивного угла γ'_i принимается за новое начальное значение, и расчет повторяется. По окончательным значениям углов φ_i и γ_i вычисляются координаты точки $M(x_M, y_M, z_M)$ и длины звеньев l_{ki} , $k = \overline{1,4}$. Результаты последних вычислений и определяют искомую конфигурацию и обобщенные координаты l_{ki} , φ_i , α_i , ψ_i манипулятора (рис. 6) в заданный момент времени t_i [19]

Область возможного применения манипуляционных механизмов определяется рядом критериев, но величина рабочей зоны является одним из главных параметров [20, 21]. С целью построения зоны обслуживания, необходимо определить координаты точки $M(x_M, y_M, z_M)$ [22] пересечения осей исполнительных звеньев через обобщенные координаты манипулятора $l_k(t)$, $k = \overline{1,4}$, т.е. решить прямую задачу кинематики. Затем, с учетом ограничений, накладываемых на углы поворота звеньев захвата, углы относительных поворотов в вертикальной плоскости $\alpha(t)$ от -100° до 100° , в горизонтальной плоскости $\psi(t)$ -80° до 80° , находим координаты точки $E[x_E(t), y_E(t), z_E(t)]$ [23] и получаем зону обслуживания захвата, которая представляет пространственную плоскость, ограниченную сетью кривых.

Полученные научные результаты.

На рис. 7 отражены результаты численного моделирования, подтверждающие работоспособность предложенного алгоритма, продемонстрирована зона обслуживания манипулятора параллельно-последовательной структуры с захватом.

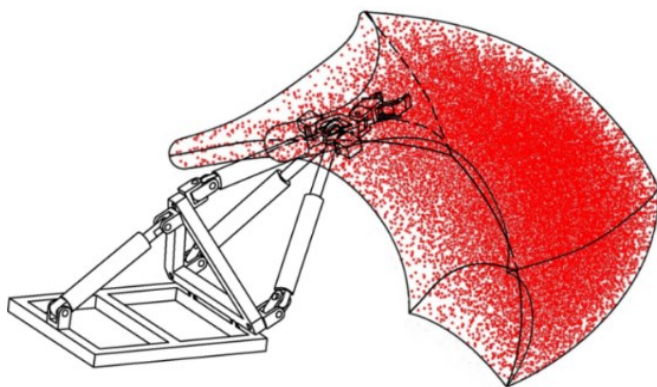


Рис. 7. Зона обслуживания манипулятора с захватом

Алгоритм построения зоны обслуживания манипулятора с захватом реализован в среде Mathcad, разработанные приложения могут моделировать зоны обслуживания манипуляторов различных типоразмеров в

средствах автоматизированного проектирования, например, в среде Компас-3D.

Параметры зоны захвата изменяется в пределах от минимальных значений координат характерной точки E: $x_{\min} = -1223$ мм, $y_{\min} = 155$ мм, $z_{\min} = -1897$ мм до максимальных $x_{\max} = 1223$ мм, $y_{\max} = 2155$ мм, $z_{\max} = 1784$ мм.

Заключение

Предложенная схема манипулятора параллельно-последовательной структуры на базе трипода с дополнительным трехступенным механизмом захватного устройства позволяет обеспечить необходимые параметры манипулятивности и оптимальную конфигурацию манипулятора при переводе его из начального в заданное конечное положение.

Литература

1. Глазунов В.А., Коликор А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. М.: Наука, 1991. 95 с.
2. Zhoga V., Gavrilo A., Gerasun V., Nesmianov I., Pavlovsky V., Skakunov V., Bogatyrev V., Golubev D., Dyashkin-Titov V., Vorobieva N. Walking Mobile Robot with Manipulator-Tripod. In: Proceedings of Romansy 2014 XX CISM-IFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Mechanisms and Machine Science. Springer International Publishing Switzerland. 2014. V. 22. P. 463-471.
3. Хейло С.В., Глазунов В.А., Палочкин С.В. Манипуляционные механизмы параллельной структуры. Структурный синтез. Кинематический и силовой анализ. М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2011. 153 с.
4. Корендяев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. Теоретические основы робототехники: в 2 кн. М.: Наука, 2006. Кн. 1. 383 с.
5. Филиппов Г.С. Научное обоснование и разработка механизмов параллельно-последовательной структуры для многокоординатных манипуляционных систем: дис. ... на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук / Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. М., 2019. 324 с.
6. Рыбак Л.А., Гриненко Г.П. Инновационное обрабатывающее оборудование на базе параллельных структур: перспективы и направления коммерциализации // Научно-технические исследования в машиностроении. 2013. № 7 (25). С. 32-39.
7. Бушуев В.В., Хольшев И.Г. Механизмы параллельной структуры в машиностроении // СТИН. 2001. № 1. С. 3-8.
8. Афонин В.Л., Подзоров П.В., Слепцов В.В. Обрабатывающее оборудование на основе механизмов параллельной структуры. М: Изд-во МГТУ СТАНКИН, Янус-К, 2006. 448 с.
9. Жога В.В., Дяшкин-Титов В.В., Дяшкин А.В., Воробьева Н.С., Несмиянов И.А., Николаев М.Е. Манипулятор-трипод промышленного назначения: пат. № 2651781 РФ, МПК В66С 23/44; опубл. 23.04.2018. Бюл. № 12.
10. Жога В.В., Дяшкин-Титов В.В., Дяшкин А.В., Воробьева Н.С., Несмиянов И.А., Иванов А.Г. Манипулятор-трипод параллельно-последовательной структуры: пат. № 2616493 РФ, МПК В66С 23/44; опубл. 17.04.2017. Бюл. № 11.
11. Несмиянов И.А., Николаев М.Е., Воробьева Н.С. Обоснование параметров манипулятора погрузочно-Parallel-Sequential Structures // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2019. № 58. P. 305-316.
12. Nikolaev M.E., Nesmianov I.A., Ivanov A.G., Dyashkin-Titov V.V. Loading and transport unit with a tripod manipulator and hybrid drive. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1129. P. 012063.
13. Жога В.В., Дяшкин-Титов В.В., Несмиянов И.А., Воробьева Н.С. Задача позиционирования манипулятора параллельно-последовательной структуры с управляемым захватным устройством // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 8. С. 525-530.
14. Кобринский А.А., Кобринский А.Е. Манипуляционные системы роботов. М.: Наука, 1985. 343 с.
15. Коловский М.З., Слоущ А.В. Основы динамики промышленных роботов. М.: Наука. Физматлит, 1998. 240 с.
16. Динамика управления роботами роботы / под ред. Е.И. Юревича, В.В. Козлова, В.П. Макарычева. М.: Наука. Физматлит, 1984. 336 с.
17. Zhoga V.V., Gerasun V.M., Nesmianov I.A., Vorob'eva N.S., Dyashkin-Titov V.V. Dynamic Creation of the Optimum Program Motion of a Manipulator-Tripod // Journal of Machinery Manufacture and Reability. 2015. V. 44. № 2. P. 181-186.
18. Брайсон А., Хо Ю-ши. Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972. 544 с.
19. Vorob'eva N.S., Zhoga V.V., Zhoga L.V. Dynamic Synthesis of Parallel-Sequential Structure Manipulator Control Algorithms // Mechatronics, automation, control. 2020; 21 (12): 706-715. (In Russ.)
20. Merlet J.P. Parallel Robots. L.: Kluwer Acad. Publ., 2000. 372 p.
21. Kong X., Gosselin C. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. B.: Springer, 2007. 275 p.
22. Zhoga V., Dyashkin-Titov V., Nesmianov I., Dyashkin A. Algorithm to Synthesize Control Force for Tripod Manipulator Drives. In: Ronzhin A., Shishlakov V. Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings». Smart Innovation, Systems and Technologies. Springer, Singapore. 2020. V. 154. P. 223-235.
23. Vorob'eva N., Zhoga V. Nesmianov I. Program Displacement Tracing of Executive Devices by the Manipulator Drives

1. Glazunov V.A., Koliskor A.SH, Krajnev A.F. Spatial mechanisms of parallel structure. M.: Nauka, 1991. 95 p.
2. Zhoga V., Gavrilov A., Gerasun V., Nesmiyanov I., Pavlovsky V., Skakunov V., Bogatyrev V., Golubev D., Dyashkin-Titov V., Vorob'eva N. Walking Mobile Robot with Manipulator-Tripod. In: Proceedings of Romansy 2014 XX CISM-IFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Mechanisms and Machine Science. Springer International Publishing Switzerland. 2014. V. 22. P. 463-471.
3. Hejlo S.V., Glazunov V.A., Palochkin S.V. Manipulation mechanisms of a parallel structure. Structural synthesis. Kinematic and force analysis. M.: MGTU im. A.N. Kosygina, 2011. 153 p.
4. Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I. Theoretical foundations of robotics: v 2 kn. M.: Nauka, 2006. Kn. 1. 383 p.
5. Filippov G.S. Scientific substantiation and development of parallel-sequential structure mechanisms for multi-coordinate manipulation systems: dis. ... na soisk. uchen. step. d-ra tekhn. nauk / In-t mashinovedeniya im. A.A. Blagonravova RAN. M., 2019. 324 p.
6. Rybak L.A., Grinenko G.P. Innovative processing equipment on the basis of parallel structures: prospects and directions of commercialization // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2013. № 7 (25). P. 32-39.
7. Bushuev V.V., Hol'shev I.G. The mechanisms of parallel structure in mechanical engineering // STIN (Russian Engineering Research). 2001. № 1. P. 3-8.
8. Afonin V.L., Podzorov P.V., Slepcev V.V. Processing equipment on the basis of mechanisms of parallel kinematics. M: Izd-vo MGTU STANKIN, YAnus-K, 2006. 448 p.
9. Zhoga V.V., Dyashkin-Titov V.V., Dyashkin A.V., Vorob'eva N.S., Nesmiyanov I.A., Nikolaev M.E. Manipulator-tripod for industrial purposes: pat. № 2651781 RF, MPK V66S 23/44; opubl. 23.04.2018. Byul. № 12.
10. Zhoga V.V., Dyashkin-Titov V.V., Dyashkin A.V., Vorob'eva N.S., Nesmiyanov I.A., Ivanov A.G. Manipulator-tripod of parallel-serial structure: pat. № 2616493 RF, MPK V66S 23/44; opubl. 17.04.2017. Byul. № 11.
11. Nesmiyanov I.A., Nikolaev M.E., Vorob'eva N.S. Substantiation of parameters of the manipulator of the loading and transport robot // Izvestia VSTU. 2020. № 9 (244). P. 65-68.
12. Nikolaev M.E., Nesmiyanov I.A., Ivanov A.G., Dyashkin-Titov V.V. Loading and transport unit with a tripod manipulator and hybrid drive. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1129. P. 012063.
13. Zhoga V.V., Dyashkin-Titov V.V., Nesmiyanov I.A., Vorob'eva N.S. Manipulator of parallel-serial structure with a controlled gripper positioning task // Mechatronics, automation, control. 2016. V. 17. № 8. P. 525-530.
14. Kobrinskij A.A., Kobrinskij A.E. Manipulation systems of robots. M.: Nauka, 1985. 343 p.
15. Kolovskij M.Z., Sloushch A.V. Foundations of Industrial Robot Dynamics. M.: Nauka. Fizmatlit, 1998. 240 p.
16. Dynamics of robot control robots / pod red. E.I. YUrevicha, V.V. Kozlova, V.P. Makarycheva. M.: Nauka. Fizmatlit, 1984. 336 p.
17. Zhoga V.V., Gerasun V.M., Nesmiyanov I.A., Vorob'eva N.S., Dyashkin-Titov V.V. Dynamic Creation of the Optimum Program Motion of a Manipulator-Tripod // Journal of Machinery Manufacture and Reability. 2015. V. 44. № 2. P. 181-186.
18. Brajson A., Ho YU-shi. Applied theory of optimal control. M.: Mir, 1972. 544 p.
19. Vorob'eva N.S., Zhoga V.V., Zhoga L.V. Dynamic Synthesis of Parallel-Sequential Structure Manipulator Control Algorithms // Mechatronics, automation, control. 2020; 21 (12): 706-715. (In Russ.)
20. Merlet J.P. Parallel Robots. L.: Kluwer Acad. Publ., 2000. 372 p.
21. Kong X., Gosselin C. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. B.: Springer, 2007. 275 p
22. Zhoga V., Dyashkin-Titov V., Nesmiyanov I., Dyashkin A. Algorithm to Synthesize Control Force for Tripod Manipulator Drives. In: Ronzhin A., Shishlakov V. Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings». Smart Innovation, Systems and Technologies. Springer, Singapore. 2020. V. 154. P. 223-235.
23. Vorob'eva N., Zhoga V., Nesmiyanov I. Program Displacement Tracing of Executive Devices by the Manipulator Drives of Parallel-Sequential Structures // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2019. № 58. P. 305-316.