

УДК 621.01

doi: 10.18698/0536-1044-2019-8-18-24

Кинематический анализ механизма параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы

Г.С. Филиппов

ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»

Kinematic Analysis of a Parallel-Sequential Structure Mechanism with Five Degrees of Freedom

G.S. Filippov

Federal State Budgetary Institution of Science — Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Синтезирован механизм параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы, способный решать задачу обработки объектов, имеющих протяженный размер в одном направлении. При этом рассматриваемый механизм может обладать высокой нагрузочной способностью. Соответствующие задачи связаны с изготовлением лопаток турбин реактивных двигателей, а также с вертебральными операциями (на позвоночнике человека). Движение вдоль координаты, которая связана с большими размерами обрабатываемого объекта, обеспечивается с помощью начальной поступательной пары, снабженной двигателем. Затем следует плоский частичный плоский механизм параллельной структуры с тремя степенями свободы, далее — вращательная кинематическая пара. Выполнен кинематический анализ рассматриваемого механизма, решена обратная задача о его положениях. При решении задачи о скоростях механизма параллельно-последовательной структуры применен метод Анджелеса–Гослена, предназначенный для механизмов параллельной структуры. Приведены результаты численного эксперимента.

Ключевые слова: метод Анджелеса–Гослена, механизм параллельно-последовательной структуры, задача о скоростях, обратная задача о положениях, неявные функции

The article presents a synthesis of a mechanism of parallel-sequential structure with five degrees of freedom capable of processing objects with an extended dimension in one direction, wherein the considered mechanism can have a high bearing capacity. Corresponding problems are associated with manufacturing jet turbine airfoil as well as vertebrae operations (on the human spine). Movement along a coordinate that is linked to large dimensions of a processed object is provided using the initial translation pairs equipped with a motor. It is followed by a flat partial parallel structure mechanism with three degrees of freedom, and further – by a revolute kinematic pair. A kinematic analysis of the considered mechanism is performed, and the inverse kinematic problem is solved. The Angeles-Gosselin method for parallel structure mechanisms is used when performing velocity calculations of the parallel-sequential structure mechanism. The results of the numerical experiment are presented.

Keywords: Angeles-Gosselin method, parallel-sequential structure mechanism, velocity calculation, inverse kinematics problem, implicit function

Развитие роботов-манипуляторов и их внедрение в различные отрасли науки и промышленности осуществляются высокими темпами. Применение роботизированных механизмов в различных сферах деятельности происходит повсеместно, открывая новые возможности для разработчиков и производителей. При этом растет разнообразие структур и компоновок механизмов, используемых в аддитивных технологиях [1, 2].

Современные способы создания и обработки деталей для различных отраслей промышленности, включая авиационную, ставят сложные задачи перед разработчиками механизмов [3, 4]. Характеристики роботизированных манипуляторов для высокоточного пространственного изготовления и обработки деталей синтезируемых механизмов, такие как точность и грузоподъемность, могут быть противоречивыми и трудновыполнимыми для разработчиков [4, 5].

Учитывая высокую значимость развития технологий высокоточного изготовления и обработки деталей, в Институте машиноведения им. А.А. Благодирова синтезирован механизм для решения данных задач, проведен его структурный анализ [7, 8].

Цель работы — провести кинематический анализ синтезированного механизма, получить решение обратной задачи о положениях и решить задачу о скоростях.

Рассматриваемый механизм параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы (рис. 1) содержит основание 9 и соединенные между собой кинематическими цепями направляющую раму 8 и выходное звено

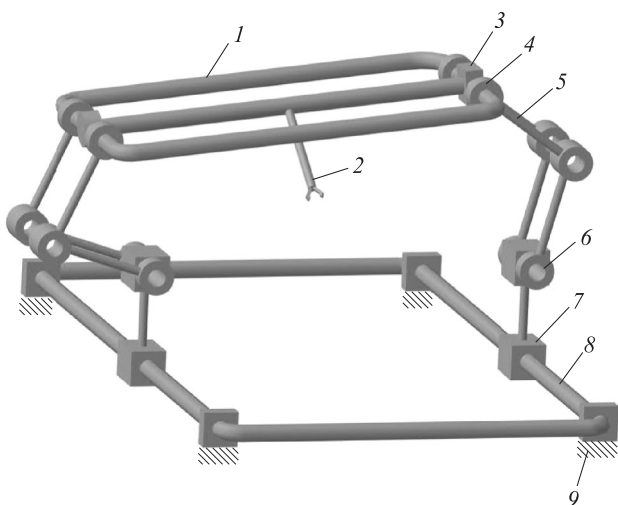


Рис. 1. Модель механизма параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы

с установленным на нем рабочим органом 2. Направляющая выполнена в виде жестко закрепленной на основании по углам прямоугольной рамы 8, на двух параллельных сторонах которой имеются подвижные кинематические пары 7.

Выходное звено представляет собой прямоугольную раму 1. На ее двух сторонах, параллельных соответствующим сторонам направляющей с кинематическими парами, расположены две пары поворотных шарниров 4. Последние соединены с подвижными парами, расположенными на направляющей, двумя кинематическими цепями, каждая из которых включает в себя две пары параллельных жестких звеньев 5.

Звенья 5 с одной стороны сопряжены между собой и с рамой выходного звена поворотными шарнирами 4, а с другой — двойным поворотным шарниром 6 с вертикально установленным на подвижном шарнире направляющей рамы 8. Причем рабочий орган 2 закреплен на средней оси рамы выходного звена, связанной с вращательными приводами 3, расположенными на двух сторонах рамы 1 между поворотными шарнирами 4.

Для решения обратной задачи о положениях рассматриваемого механизма определяем центры систем координат (СК) выходного звена и основания (см. рис. 1). Рассчитываем переходную матрицу из СК выходного звена к СК основания:

$$M = A_{xyz} A_{\alpha} A_{\beta} = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & x \\ \sin\beta \sin\alpha & \cos\alpha & -\cos\beta \sin\alpha & y \\ -\cos\alpha \sin\beta & \sin\alpha & \cos\beta \cos\alpha & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где A_{xyz} — матрица смещения вдоль осей СК OXYZ; A_{α} и A_{β} — матрицы вращения вокруг осей OX и OY; β и α — углы, определяющие вращение вокруг осей OY и OX; x , y и z — расстояния, задающие смещение вдоль осей OX, OY и OZ точки крепления инструмента в СК основания — $A_0(x, y, z)$.

Далее вычисляем переход точки A_0 из СК выходного звена в СК основания через матрицу преобразования

$$M_1 = A_{1xyz} A_{\alpha} A_{\beta} A_{z_1} = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & x_1 - L_1 \sin\beta \\ \sin\beta \sin\alpha & \cos\alpha & -\cos\beta \sin\alpha & y_1 + L_1 \cos\beta \sin\alpha \\ -\cos\alpha \sin\beta & \sin\alpha & \cos\beta \cos\alpha & z_1 - L_1 \cos\beta \cos\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где A_{1xyz} — матрица перемещения вдоль осей СК OXYZ на расстояния x_1 , y_1 , z_1 , (x_1, y_1, z_1) в геометрический центр рамки — точку A_1 (рис. 2);

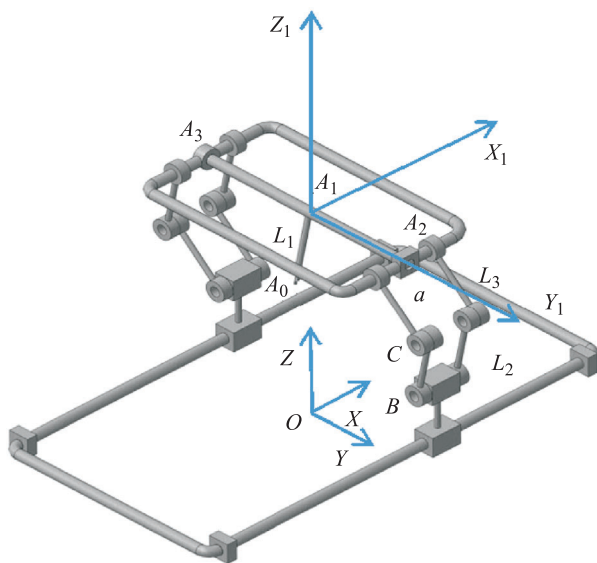


Рис. 2. Схема расположения основных элементов механизма параллельно-последовательной структуры

A_{z_1} — матрица перемещения на длину выходного звена L_1 .

Приравнявая матрицы (1) и (2), составим матрицу преобразования в СК основания, учитывающую поворот рамки вокруг оси OX :

$$MP = A_{1xyz} A_\alpha = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x + L_1 \sin \beta \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & y - L_1 \cos \beta \sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & z + L_1 \cos \beta \cos \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Для нахождения перемещений в приводах зададим геометрические размеры подвижной рамки. Сторону, параллельную оси OX , обозначим как a , а параллельную оси OY — b (см. рис. 2). Зададим координаты точек A_2 и A_3 , расположенные в точках пересечения подвижной рамки и оси вращения выходного звена. Координаты точек A_2 и A_3 в СК $A_1X_1Y_1Z_1$ с центром в точке A_1 (рис. 3):

$$A_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ b/2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad A_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ -b/2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Для получения координат точек A_2 и A_3 в СК основания необходимо применить матрицу преобразования MP (3) и выражения (4):

$$A_{2o} = MP \cdot A_2;$$

$$A_{3o} = MP \cdot A_3.$$

Отсюда

$$A_{2o} = \begin{pmatrix} x + L_1 \sin \beta \\ y + \frac{b \cos \alpha}{2} - L_1 \cos \beta \sin \alpha \\ z + \frac{b \sin \alpha}{2} + L_1 \cos \beta \cos \alpha \\ 1 \end{pmatrix};$$

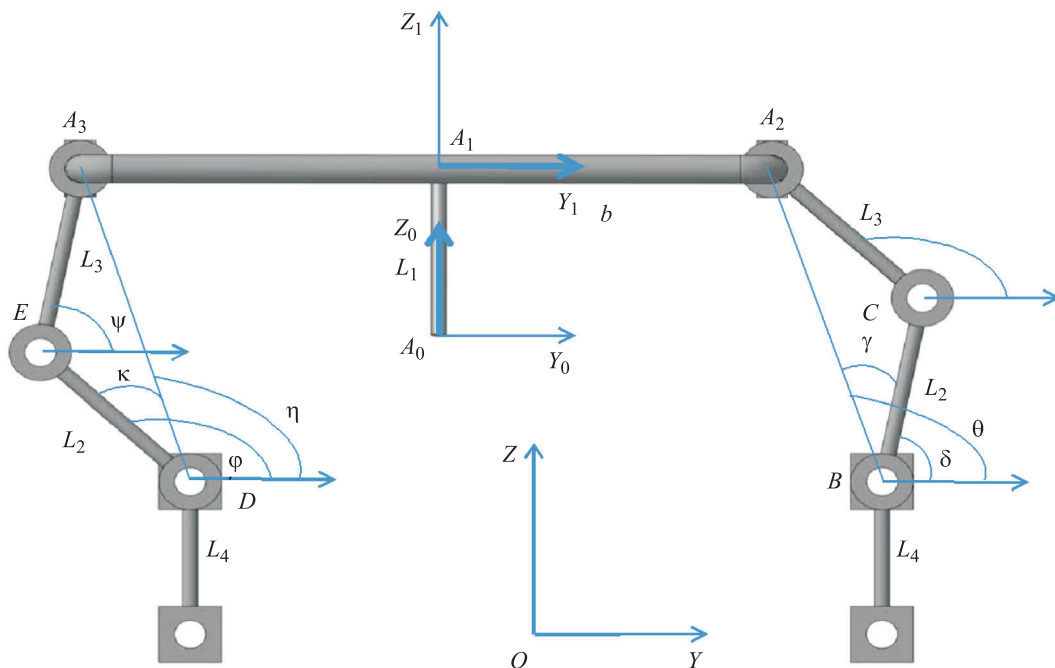


Рис. 3. Схема частичного плоского механизма параллельной структуры

$$A_{30} = \begin{pmatrix} x + L_1 \sin \beta \\ y - \frac{b \cos \alpha}{2} - L_1 \cos \beta \sin \alpha \\ z - \frac{b \sin \alpha}{2} + L_1 \cos \beta \cos \alpha \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Точки соединения промежуточных звеньев обозначим как $B(xb, yb, zb)$, $C(xc, yc, zc)$, $D(xd, yd, zd)$ и $E(xe, ye, ze)$, звенья, связывающие точки A_2, C и A_3, E — L_3 , точки C, B и D, E — L_2 . Введем обозначения углов (см. рис. 3): между промежуточным звеном L_2 и плоскостью OXY — δ и φ ; между звеном L_3 и плоскостью OXY — ψ ; между звеном, соединяющим точки A_2, B , и плоскостью OXY — θ ; между звеном, связывающим точки A_2, B , и звеном L_2 — γ ; между звеном, соединяющим точки A_3, D , и плоскостью OXY — η ; между звеном, связывающим точки A_3, D , и звеном L_2 — κ .

Точки B и D соединены с основанием звеньями L_4 . Обозначим обобщенные координаты как $q_1 - q_5$ (рис. 4). После преобразований получим решение обратной задачи о положениях рассматриваемого механизма:

$$\begin{cases} q_1 = x + L_1 \sin \beta; \\ q_2 = \arccos \theta \pm \arccos \gamma; \\ q_3 = \arccos \left(\frac{-yb - L_2 \cos \delta + y + \frac{b \cos \alpha}{2} - L_1 \cos \beta \sin \alpha}{L_3} \right); \\ q_4 = \arccos \eta \pm \arccos \kappa; \\ q_5 = \beta. \end{cases} \quad (5)$$

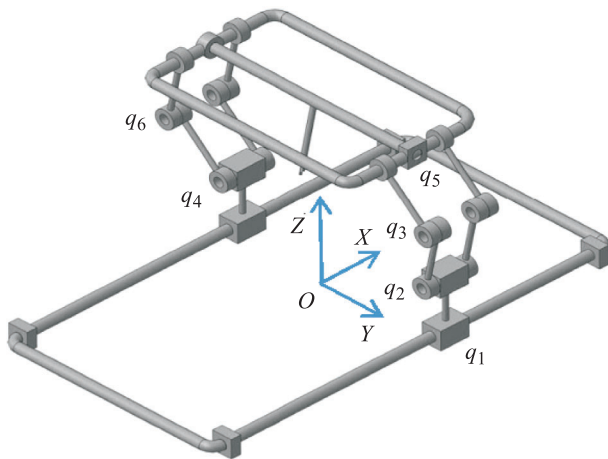


Рис. 4. Схема расположения приводов рассматриваемого механизма

Для решения задачи о скоростях используем метод Анджелеса–Гослена [9, 10], суть которого заключается в дифференцировании уравнений связей. Составляем указанные уравнения связей в неявном виде, проводим дифференцирование и получаем зависимость между обобщенными скоростями в приводах ω и абсолютными скоростями центра выходного звена v :

$$Av = (-B)\omega, \quad (6)$$

где A — матрица частных производных от неявных функций по независимым координатам α, β, x, y, z ; B — матрица частных производных от неявных функций по q_i .

Тогда уравнение (6) принимает вид

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_1}{\partial \beta} & \frac{\partial F_1}{\partial x} & \frac{\partial F_1}{\partial y} & \frac{\partial F_1}{\partial z} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_2}{\partial \beta} & \frac{\partial F_2}{\partial x} & \frac{\partial F_2}{\partial y} & \frac{\partial F_2}{\partial z} \\ \frac{\partial F_3}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_3}{\partial \beta} & \frac{\partial F_3}{\partial x} & \frac{\partial F_3}{\partial y} & \frac{\partial F_3}{\partial z} \\ \frac{\partial F_4}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_4}{\partial \beta} & \frac{\partial F_4}{\partial x} & \frac{\partial F_4}{\partial y} & \frac{\partial F_4}{\partial z} \\ \frac{\partial F_5}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_5}{\partial \beta} & \frac{\partial F_5}{\partial x} & \frac{\partial F_5}{\partial y} & \frac{\partial F_5}{\partial z} \\ \delta \alpha & \delta \beta & \delta x & \delta y & \delta z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial q_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial F_2}{\partial q_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial F_3}{\partial q_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial F_4}{\partial q_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial F_5}{\partial q_5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \end{pmatrix},$$

где $F_1 - F_5$ — функции уравнений связей, составленные в неявном виде.

Для составления функций в неявном виде используем систему уравнений (5):

$$\begin{cases} F_1 = x + L_1 \sin \beta - q_1; \\ F_2 = \cos(\theta \pm \gamma) - \cos q_2; \\ F_3 = \frac{-yb - L_2 \cos \delta + y + \frac{b \cos \alpha}{2} - L_1 \cos \beta \sin \alpha}{L_3} - \cos q_3; \\ F_4 = \cos(\eta \pm \kappa) - \cos q_4; \\ F_5 = \beta - q_5. \end{cases}$$

Приведем некоторые из частных производных от неявных функций:

$$\frac{\partial F_1}{\partial \alpha} = 0; \quad \frac{\partial F_1}{\partial \beta} = L_1 \cos \beta; \quad \frac{\partial F_1}{\partial x} = 1; \quad \frac{\partial F_1}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial F_1}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial F_2}{\partial x} = 0;$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial y} = \left(z - L_4 + \frac{b \sin \alpha}{2} + L_1 \cos \beta \cos \alpha \right)^2 - L_3^2 + L_2^2 + \\ + \left(y - \frac{b}{2} + \frac{b \cos \alpha}{2} - L_1 \cos \beta \sin \alpha \right)^2 - \dots$$

Приведем пример решения задачи о положении рассматриваемого механизма. Зададим его геометрические размеры: $L_1 = 300$ мм; $L_2 = 330$ мм; $L_3 = 330$ мм; $L_4 = 270$ мм. Размеры подвижной рамы: $a = 681$ мм; $b = 1100$ мм. Координаты точек B и D соответственно:

$$(xb = 155 \text{ мм}; \quad yb = 550 \text{ мм}; \quad zb = 270 \text{ мм})$$

и

$$(xd = 155 \text{ мм}; \quad yd = -550 \text{ мм}; \quad zd = 270 \text{ мм}).$$

Зададим положение выходного звена и углы его ориентации в пространстве:

$$\alpha = 15^\circ 13'; \quad \beta = 25^\circ 20'; \quad x = 0; \quad y = 0; \quad z = 400 \text{ мм}.$$

Используя программу расчета положений механизма параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы, получим значения перемещений в приводах:

$$\begin{cases} q_1 = 0; \\ q_2 = 65^\circ; \\ q_2' = 134^\circ; \\ q_3 = 134^\circ; \\ q_3' = 65^\circ; \\ q_4 = -34^\circ; \\ q_4' = 169^\circ; \\ q_5 = 25^\circ, \end{cases}$$

где q_2', q_3', q_4' — вторые варианты положений звеньев в приводах, возникающие из-за наличия знака « \pm » в системе (5) и объясняемые возможностью достижения заданных координат выходного звена в двух положениях промежуточных звеньев.

Составим матрицы частных производных:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_1}{\partial \beta} & \frac{\partial F_1}{\partial x} & \frac{\partial F_1}{\partial y} & \frac{\partial F_1}{\partial z} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_2}{\partial \beta} & \frac{\partial F_2}{\partial x} & \frac{\partial F_2}{\partial y} & \frac{\partial F_2}{\partial z} \\ \frac{\partial F_3}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_3}{\partial \beta} & \frac{\partial F_3}{\partial x} & \frac{\partial F_3}{\partial y} & \frac{\partial F_3}{\partial z} \\ \frac{\partial F_4}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_4}{\partial \beta} & \frac{\partial F_4}{\partial x} & \frac{\partial F_4}{\partial y} & \frac{\partial F_4}{\partial z} \\ \frac{\delta F_5}{\delta \alpha} & \frac{\delta F_5}{\delta \beta} & \frac{\delta F_5}{\delta x} & \frac{\delta F_5}{\delta y} & \frac{\delta F_5}{\delta z} \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} 0 & 271,169 & 1 & 0 & 0 \\ -3,513 \cdot 10^8 & 6,443 \cdot 10^7 & 0 & 3,993 \cdot 10^5 & -4,117 \cdot 10^5 \\ -1,113 \cdot 10^8 & 4,452 \cdot 10^7 & 0 & -1,917 \cdot 10^5 & -4,117 \cdot 10^5 \\ -4,017 \cdot 10^5 & 5,706 \cdot 10^6 & 0 & 1,001 \cdot 10^5 & -1,885 \cdot 10^4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \\ \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial q_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial F_2}{\partial q_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial F_3}{\partial q_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial F_4}{\partial q_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial F_5}{\partial q_5} \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,768 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1,4 \cdot 10^8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2,378 \cdot 10^7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Зададим абсолютные скорости:

$$\dot{\alpha} = 0,21 \text{ рад/с}; \quad \dot{\beta} = 0,35 \text{ рад/с};$$

$$\dot{x} = 200 \text{ мм/с}; \quad \dot{y} = 400 \text{ мм/с}; \quad \dot{z} = 300 \text{ мм/с}.$$

Получим обобщенные скорости

$$\begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,295 \text{ м/с} \\ 0,085 \text{ рад/с} \\ -1,486 \text{ рад/с} \\ 1,527 \text{ рад/с} \\ 0,35 \text{ рад/с} \end{pmatrix}.$$

Вывод

Проведен кинематический анализ механизма параллельно-последовательной структуры с

пятью степенями свободы, имеющего перспективы использования в аддитивных технологиях, а также в испытательных и диагностических устройствах.

Литература

- [1] Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 г. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 17 ноября 2008 г. № 1662-р.
- [2] Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А., Филиппов Г.С. Актуальные проблемы машиноведения и пути их решения. Волновые и аддитивные технологии, станкостроение, роботохирургия. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2018, т. 5, с. 16–25, doi: 10.31857/S023571190001553-9
- [3] Глазунов В.А. *Механизмы параллельной структуры и их применение: робототехнические, технологические, медицинские, обучающие системы*. Москва-Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2018. 1036 с.
- [4] Филиппов Г.С., Глазунов В.А., Лактионова М.М., Терехова А.Н., Гаврилина Л.В. Разработка механизмов параллельной структуры с пятью степенями свободы для ортопедических операций и аддитивных технологий. *Машиностроение и инженерное образование*, 2018, т. 4, № 57, с. 2–11.
- [5] Григорьянц А.Г., Третьяков Р.С., Фунтиков В.А. Повышение качества поверхностных слоев деталей, полученных лазерной аддитивной технологией. *Технология машиностроения*, 2015, т. 10, с. 68–73.
- [6] Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. Манипуляционные механизмы параллельной структуры и их приложения в современной технике. *Доклады Академии наук*, 2014, т. 459, № 4, с. 428–431, doi: 10.7868/S086956521434009X
- [7] Глазунов В.А., Филиппов Г.С., Петраков А.А., Царьков А.В. *Разработка новых механизмов для современных робототехнических систем, предназначенных для технологических, медицинских, аддитивных и диагностических устройств*. В кн.: Новые механизмы в современной робототехнике. Москва, ТЕХНОСФЕРА, 2018, с. 131–143.
- [8] Филиппов Г.С., Глазунов В.А., Ласточкин А.Б. Механизм параллельной структуры с 5 степенями свободы для вертебральных операций и аддитивных технологий. *Справочник. Инженерный журнал*, 2018, т. 10, с. 55–60, doi: 10.14489/hb.2018.10.pp.055-060
- [9] Gosselin C.M., Angeles J. Singularity analysis of closed-loop kinematic chains. *IEEE Transactions on Robotics and Automatics*, 1990, vol. 6(3), pp. 281–290, doi: 10.1109/70.56660
- [10] Хейло С.В. Решение задачи о скоростях манипулятора с тремя степенями свободы с применением теории винтов. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2011, № 1, с. 77–81.

References

- [1] *Kontseptsiya dolgosrochnogo sotsial'no-ehkonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2020* [The concept of long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period up to 2020]. *Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 17 noyabrya 2008 no. 1662-r*.
- [2] Ganiev R.F., Glazunov V.A., Filippov G.S. Actual problems of engineering and their solutions. Wave and additive technologies, machine-tool construction, robot-surgery. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin*, 2018, vol. 5, pp. 16–25, doi: 10.31857/S023571190001553-9

- [3] Glazunov V.A. *Mekhanizmy parallel'noy struktury i ikh primeneniye: robototekhnicheskie, tekhnologicheskie, meditsinskie, obuchayushchie sistemy* [Parallel structure mechanisms and their application: robotic, technological, medical, training systems]. Moscow-Izhevsk, Institut komp'yuternykh issledovaniy publ., 2018. 1036 p.
- [4] Filippov G.S., Glazunov V.A., Laktionova M.M., Terekhova A.N., Gavrilina L.V. Engineering of 5dof parallel-sequential structure mechanisms for vertebral and additive technologies. *Mashinostroeniye i inzhenernoye obrazovaniye*, 2018, vol. 4, no. 57, pp. 2–11 (in Russ.).
- [5] Grigor'yants A.G., Tret'yakov R.S., Funtikov V.A. The quality improving of the parts surface layers of parts received by means of laser additive technology. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2015, vol. 10, pp. 68–73 (in Russ.).
- [6] Ganiev R.F., Glazunov V.A. Manipulation mechanisms of parallel structure and their applications in modern technology. *Doklady Akademii nauk*, 2014, vol. 459, no. 4, pp. 428–431, doi: 10.7868/S086956521434009X
- [7] Glazunov V.A., Filippov G.S., Petrakov A.A., Tsar'kov A.V. *Razrabotka novykh mekhanizmov dlya sovremennykh robototekhnicheskikh sistem, prednaznachennykh dlya tekhnologicheskikh, meditsinskikh, additivnykh i diagnosticheskikh ustroystv* [Development of new mechanisms for modern robotic systems designed for technological, medical, additive and diagnostic devices]. *V kn.: Novye mekhanizmy v sovremennoy robototekhnike* [New mechanisms in modern robotics]. Moscow, TEKHNOSEFERA publ., 2018, pp. 131–143.
- [8] Filippov G.S., Glazunov V.A., Lastochkin A.B. 5-dof parallel structure mechanism for vertebral surgeries and additive manufacturing. *Handbook. An Engineering journal with appendix*, 2018, vol. 10, pp. 55–60 (in Russ.), doi: 10.14489/hb.2018.10.pp.055-060
- [9] Gosselin C.M., Angeles J. Singularity analysis of closed-loop kinematic chains. *IEEE Transactions on Robotics and Automatics*, 1990, vol. 6(3), pp. 281–290, doi: 10.1109/70.56660
- [10] Kheylo S.V. Solving the problem of manipulator speeds with three degrees of freedom using the theory of screws. *Engineering and automation problems*, 2011, no. 1, pp. 77–81 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 08.04.2019

Информация об авторе

ФИЛИППОВ Глеб Сергеевич — кандидат физико-математических наук, заместитель директора ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: filippov.gleb@gmail.com).

Information about the author

FILIPPOV Gleb Sergeevich — Candidate of Science (Physics and Maths), Deputy Director. Federal State Budgetary Institution of Science — Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malii Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: filippov.gleb@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Филиппов Г.С. Кинематический анализ механизма параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 8, с. 18–24, doi: 10.18698/0536-1044-2019-8-18-24

Please cite this article in English as:

Filippov G.S. Kinematic Analysis of a Parallel-Sequential Structure Mechanism with Five Degrees of Freedom. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 8, pp. 18–24, doi: 10.18698/0536-1044-2019-8-18-24