

УДК 621.865.8

doi:10.18720/SPVPU/2/id24-110

А.В. Нелюбова¹, В.В. Жога²

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДУЛЯ НА ОСНОВЕ МАНИПУЛЯТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СВЯЗЬЮ



¹ Анна Васильевна Нелюбова,
Волгоградский государственный технический университет
Россия, Волгоград
Тел.: (937)708-0948, E-mail: mqdschen@yandex.ru.



² Виктор Викторович Жога,
Волгоградский государственный технический университет
Россия, Волгоград
Тел.: (8442)24-81-13, E-mail: viczhoga@gmail.com.

Аннотация

В работе рассмотрен технологический модуль на основе манипулятора параллельно-последовательной структуры с дополнительной пассивной связью. Особенностью манипулятора, построенного на основе параллельно-последовательной структуры, является повышение жесткости и точности по сравнению классическими конструкциями манипуляторов. В работе получены решения для прямой и обратной задач кинематики, а также представлен алгоритм решения задачи позиционирования характерной точки выходного звена манипулятора. Решена задача синтеза программных перемещений исполнительных звеньев манипулятора по заданной траектории захвата манипулятора.

Ключевые слова: технологический модуль, параллельно-последовательный манипулятор, прямая задача кинематики, обратная задача кинематики, позиционирование манипулятора.

Введение

В связи с активным внедрением систем автоматизации в промышленное производство применение нашли манипуляторы

параллельно-последовательной (гибридной) структуры [1]. Такие манипуляторы могут применяться для механической обработки крупногабаритных объектов [2]. Особенность таких конструкций заключается в сочетании достоинств манипуляторов последовательной структуры (большая рабочая зона, маневренность) и манипуляторов параллельной структуры (высокие жесткость и точность позиционирования, возможность высокоскоростной обработки) [3,4,5]. Манипуляторы гибридной структуры могут стать альтернативным решением для задач, требующих работы в большом рабочем пространстве при соблюдении высокой точности обработки [6]. Актуальной задачей для гибридных манипуляторов считается разработка теоретических методов для определения аналитических зависимостей, основанных на разработке программ перемещений выходного звена манипулятора с учетом заданной технологической операции. Цель исследования заключается в разработке методов исследования манипулятора параллельно-последовательной структуры с дополнительной пассивной связью для обеспечения согласованной работы его приводов при выполнении различных технологических операций.

Различные конструкции параллельных и гибридных манипуляторов, а также их полный кинематический анализ представлены в работах [7, 8, 9]. Основным недостатком таких конструкций заключается в наличии изгибающих моментов в линейных приводах при нагрузке рабочего органа. В предлагаемой конструкции введена дополнительная пассивная связь, которая принимает изгибающие моменты. Таким образом, линейные привода получают только продольную нагрузку, что предотвращает возможность появления деформаций и поломки исполнительных приводов.

Описание объекта исследования

Рассматривается манипулятор параллельно-последовательной структуры с дополнительной пассивной связью (рис. 1, 2) [10, 11], который состоит из трех актуаторов 1-3, одни концы которых с помощью двухподвижных шарниров закреплены на треугольном основании ABC , а другие концы установлены с помощью сферических шарниров на выходном звене 6 в точках крепления M_1, M_2, M_3 . Актуатор 4 обеспечивает поворот поворотного основания ABC вокруг горизонтальной оси. Для обеспечения жесткости конструкции и точности позиционирования рабочего органа к выходному звену 6 крепится одним концом звено 5, которое принимает на себя изгибающие моменты, возникающие при работе манипулятора-трипода. Другим концом металлическая полая труба 5 опирается на шарнирный узел 7, обеспечивающий продольное

связанная с неподвижным основанием, и подвижные системы координат $x_i y_i z_i$ ($i = 1-5$), связанные с корпусом каждого линейного исполнительного звена и полый трубой с началом в точках их крепления [10]. Ориентация каждой подвижной системы координат относительно абсолютной $Oxuz$ задается двумя углами – δ_i при повороте вокруг оси z_i и углом ψ_i при повороте вокруг оси x_i .

Конфигурация манипулятора определяется обобщенными координатами: длиной отрезка $q_1 = KM$, углами $q_2 = \psi$, $q_3 = \delta$, определяющими положение подвижной системы координат $x_5 y_5 z_5$ относительно неподвижной $Oxuz$, а также углом $q_4 = \varphi$ наклона основания манипулятора [12].

В качестве характерной точки выходного звена манипулятора выбирается точка $M(x(t), y(t), z(t))$. Выражения углов ориентации звена KM через координаты точки M (решение обратной задачи кинематики) имеют вид [13]

$$\sin \delta_5 = -\frac{x_M}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}}; \quad \cos \delta_5 = \frac{(y_M + OD)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}}; \quad (1)$$

$$\sin \psi_5 = -\sqrt{\frac{x_M^2 + (y_M + OD)^2}{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}}; \quad \cos \psi_5 = \frac{(z_M + DK)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}}.$$

Решение обратной задачи кинематики, через длины исполнительных звеньев манипулятора, имеет вид [14]:

$$l_1 = \sqrt{\begin{aligned} & x_M^2 + y_M^2 + z_M^2 + r^2 + OA^2 - 2r \frac{(z_M + DK)y_M}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} \frac{(y_M + OD)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \\ & - 2OA \left(r \frac{(z_M + DK)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} \frac{(y_M + OD)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} - y_M \right) \sin \varphi + \\ & + 2z_M r \sqrt{\frac{x_M^2 + (y_M + OD)^2}{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} - 2OA \left(r \sqrt{\frac{x_M^2 + (y_M + OD)^2}{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} + z_M \right) \cos \varphi \end{aligned}} \quad (2)$$

$$l_2 = \sqrt{\begin{aligned} & (x_M - OB)^2 + y_M^2 + z_M^2 + r^2 - 2z_M r \sqrt{\frac{x_M^2 + (y_M + OD)^2}{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} \sin \alpha + \\ & + 2r(x_M - OB) \left(\frac{(y_M + OD)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \cos \alpha + \frac{(z_M + DK)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} \frac{x_M}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \sin \alpha \right) + \\ & + 2ry_M \left(-\cos \alpha \frac{x_M}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} + \frac{(z_M + DK)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} \frac{(y_M + OD)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \sin \alpha \right). \end{aligned}} \quad (3)$$

$$l_3 = \sqrt{\begin{aligned} & (x_M + OC)^2 + y_M^2 + z_M^2 + r^2 - 2z_M r \sqrt{\frac{x_M^2 + (y_M + OD)^2}{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} \sin \alpha - \\ & -2r(x_M + OC) \left(\frac{(y_M + OD)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \cos \alpha - \right. \\ & \left. - \frac{(z_M + DK)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} \frac{x_M}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \sin \alpha \right) + \\ & + 2ry_M \left(\frac{x_M}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \cos \alpha + \right. \\ & \left. + \frac{(z_M + DK)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}} \frac{(y_M + OD)}{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}} \sin \alpha \right) \end{aligned}} \quad (4)$$

$$l_4 = \sqrt{(OD - OA \sin \varphi)^2 + OA^2 \cos^2 \varphi}. \quad (5)$$

Решение прямой задачи кинематики относительно обобщенных координат δ, ψ, KM имеет вид:

$$\begin{cases} x_M = KM \sin \psi \sin \delta, \\ y_M = -OD - \sin \psi \cos \delta \cdot KM, \\ z_M = -DK + \cos \psi KM. \end{cases} \quad (6)$$

Трем декартовым координатам x_M, y_M, z_M могут соответствовать разные углы φ .

Решение задачи позиционирования манипулятора

Решение задачи позиционирования сводится к решению оптимизационной задачи [13], так как число обобщенных координат манипулятора (равно 4) больше числа декартовых координат (равно 3) характерной точки выходного звена, то маневренность манипулятора равна единице, и для решения задачи позиционирования рассматриваемой конструкции манипулятора необходимо сформулировать дополнительное условие. Обеспечение позиционирования манипулятора при выполнении технологических операций состоит в перемещении его из начального состояния, которое определяется координатами начальной точки, в конечное положение.

Условие для определения конфигурации манипулятора при заданных координатах характерной точки выходного звена можно получить, минимизируя следующую функцию

$$\Phi(\varphi) = C_1 [l_{1k}(\varphi) - l_{10}]^2 + C_4 [l_{4k}(\varphi) - l_{40}]^2, \quad (7)$$

с ограничениями типа неравенств

$$\varphi_{\min} \leq \varphi^* \leq \varphi_{\max}, \quad (8)$$

где C_1, C_4 – весовые коэффициенты; $\varphi_{\min}, \varphi_{\max}$ – минимальное и максимальное допустимые значения угла поворота основания манипулятора – трипода; φ^* – оптимальное значение угла поворота.

Для манипулятора эта функция (7) имеет смысл минимума изменения длин исполнительных звеньев при изменении декартовых координат характерной точки выходного звена. Выбор квадратичного критерия оправдан простотой нахождения оптимальных значений. Условия (8) накладывают ограничения на максимальные и минимальные значения длин исполнительных звеньев l_1, l_4 .

В качестве примера решения задачи позиционирования рассматривается перемещение выходного звена манипулятора из начальной точки M_0 с координатами $x_{M_0} = -200$ мм, $y_{M_0} = 400$ мм, $z_{M_0} = -100$ мм и начальном угле поворотного основания $\varphi_0 = 0,3$ рад. Известна исходная конфигурация манипулятора, которой соответствуют значения обобщенных координат $l_{10} = 719$ мм, $l_{20} = 565$ мм, $l_{30} = 535$ мм, $l_{40} = 555$ мм. Задавая координатами конечной точки M_k выходного звена манипулятора $x_{M_k} = -400$ мм, $y_{M_k} = 700$ мм, $z_{M_k} = 300$ мм, из выражений (3) и (4) однозначно определяются конечные положения длин звеньев $l_{2k} = 786$ мм, $l_{3k} = 935$ мм. Затем из условия минимума квадратичной функции (7) с учетом ограничений (8) определяются оптимальный угол поворотного основания $\varphi_k = 0,015$ рад. и длины исполнительных звеньев $l_{1k} = 808$ мм, $l_{4k} = 651$ мм, определяющие конфигурацию манипулятора в заданном положении.

Метод решения задачи кинематического синтеза программных перемещений исполнительных приводов

Для реализации определенной технологической операции необходимо совершать перемещение рабочего органа манипулятора по заранее заданной траектории по определенному закону. Известны методы для решения задач кинематического синтеза перемещений управляющих приводов для манипуляторов гибридной структуры [15]. Метод простой в реализации и используется чаще всего для получения быстрого результата [16]. Но существенный недостаток данного метода состоит в наличии экстремумов на участках законов изменения перемещений исполнительных приводных двигателей, описываемых многочленами, что препятствует синтезу системы управления с организацией обратных связей по скоростям [17].

В связи с этим предлагается новый метод кинематического синтеза. Время перемещения рабочего органа T задается в зависимости от конкретной технологической операции с учетом реализуемости процесса

приводами манипулятора. Траектория разбивается на m отрезков через интервалы времени Δt . Для каждой точки на траектории с координатами $x(t_i)$, $y(t_i)$, $z(t_i)$ решением задачи позиционирования, находится последовательность значений значения обобщенных координат $q_k(t_i)$. Полученные значения обобщенных координат аппроксимируются полиномом степени n на интервале времени от $t = 0$ до $t = T$. Общий вид полинома для k -ой обобщенной координаты имеет вид:

$$q_k(t) = A_{nk}t^n + A_{n-1,k}t^{n-1} + \dots + A_{1,k}t + A_{0k}. \quad (9)$$

Задаются граничные условия для $t = 0$ и $t = T$: значения обобщенных координат $q_k(0)$ и $q_k(T)$, значения скоростей $\dot{q}_k(0)$ и $\dot{q}_k(T)$. Также могут использоваться и значения ускорений $\ddot{q}_k(0)$ и $\ddot{q}_k(T)$, которые выбираются исходя из принятого закона изменения ускорения.

Таким образом, формируются шесть линейных уравнений относительно $n+1$ коэффициентов полинома (9). Необходимо составить еще $n-5$ уравнений для расчета оставшихся коэффициентов полинома, которые находятся из условия минимума квадратичной функции, представляющей сумму квадратов отклонений значений полинома от значений обобщенных координат $q_k(t_i)$:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{n-1} [q_k(t_i) - q_{ki}(t_i)]^2. \quad (10)$$

В качестве примера реализации рассматривается движение точки M выходного звена манипулятора по окружности $x_M^2 + (z_M - h)^2 = R^2$, $y_M(t) = \text{const} = 500$ мм, $h = 400$ мм с центром в точке $O(0;500;400)$ и радиусом $R = 400$ мм из точки $M_0(x_0 = 400$ мм, $y_0 = 500$ мм, $z_0 = 400$ мм) в точку $M_k(x_k = -400$ мм, $y_k = 500$ мм, $z_k = 400$ мм). Закон изменения дуговой координаты принимаем в форме

$$S(t) = \pi R \frac{t^3}{T^3} \left(10 - 15 \frac{t}{T} + 6 \frac{t^2}{T^2} \right), \quad (11)$$

который обеспечивает равенство нулю значений скоростей и ускорений в начальной и конечной точках траектории.

Полуокружность разбиваем на 16 отрезков через равные интервалы времени 0,5 с. Конечное время перемещения выходного звена составляет $T = 8$ с. Перед началом выполнения технологической операции манипулятор-трипод находится в исходном положении (угол поворота поворотного основания $\varphi = 0^\circ$, длины приводов минимальны). Конфигурацию манипулятора в момент начала выполнения технологической операции определяем из условия минимума функции:

$$\Phi = \frac{1}{2} [l_{01} - l_{1\min}]^2 + \frac{1}{2} [l_{04} - l_{4\min}]^2 \quad (12)$$

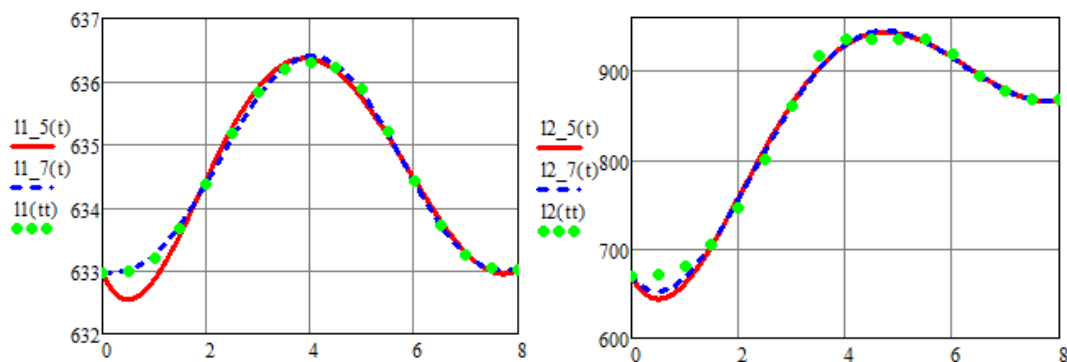
Исследуются случаи аппроксимации траектории полиномами пятой $n = 5$ и седьмой степени $n = 7$.

В результате получены выражения полиномов для законов изменения длин исполнительных приводов при аппроксимации траектории полиномами пятой и седьмой степени:

$$\begin{cases} l_{1_5}(t) = (-1,937 \cdot 10^{-3})t^5 + 0,061t^4 - 0,624t^3 + 2,327t^2 - 1,87t + 632,97 \\ l_{2_5}(t) = -0,083t^5 + 2,752t^4 - 30,297t^3 + 125,067t^2 - 105,42t + 668,97 \\ l_{3_5}(t) = -0,179t^5 + 4,754t^4 - 42,621t^3 + 140,146t^2 - 121,25t + 867,55 \\ l_{4_5}(t) = (-1,911 \cdot 10^{-3})t^5 + 0,059t^4 - 0,605t^3 + 2,241t^2 - 1,783t + 656,05 \end{cases}$$

$$\begin{cases} l_{1_7}(t) = (-3,085 \cdot 10^{-5})t^7 + (-9,803 \cdot 10^{-11})t^6 + 0,011t^5 - 0,119t^4 + 0,338t^3 + 0,072t^2 - \\ - 0,015t + 632,97 \\ l_{2_7}(t) = (-5,627 \cdot 10^{-4})t^7 + (7,106 \cdot 10^{-9})t^6 + 0,162t^5 - 0,535t^4 - 12,743t^3 + 83,951t^2 - \\ - 71,591t + 668,97 \\ l_{3_7}(t) = (-2,894 \cdot 10^{-3})t^7 + (-1,725 \cdot 10^{-9})t^6 + 1,08t^5 - 12,155t^4 + 47,675t^3 - 71,35t^2 + \\ + 52,764t + 867,55 \\ l_{4_7}(t) = (-2,764 \cdot 10^{-5})t^7 + (-8,433 \cdot 10^{-11})t^6 + 0,01t^5 - 0,102t^4 + 0,257t^3 + 0,221t^2 - \\ - 0,121t + 656,05 \end{cases}$$

На рис. 3 представлены законы изменения длин исполнительных звеньев $l_1(t)$, $l_2(t)$, $l_3(t)$, $l_4(t)$ для двух видов аппроксимирующих полиномов в течение времени $T = 8$ с. Также обозначены исходные точки траектории.



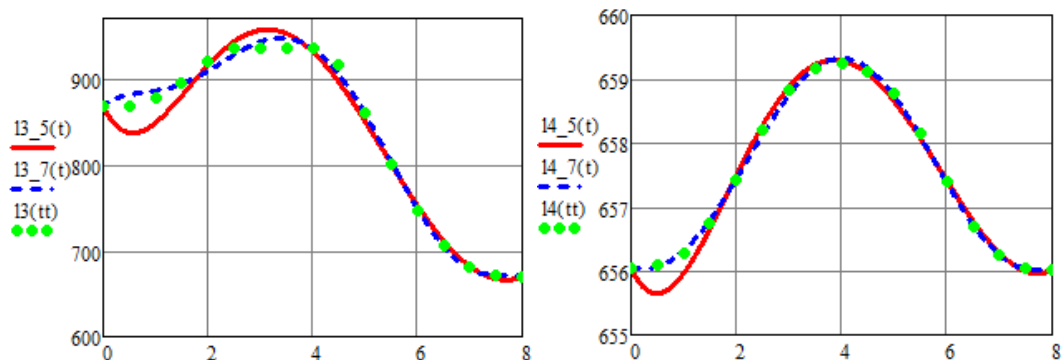


Рис. 3. – Законы изменения исполнительных звеньев манипулятора при перемещении по полуокружности

Максимальные отклонения значения аппроксимирующего полинома пятой степени от исходного значения $\Delta l_1(t) = 0,46$ мм, $\Delta l_2(t) = 26,71$ мм, $\Delta l_3(t) = 31,89$ мм, $\Delta l_4(t) = 0,44$ мм, а для полинома седьмой степени $\Delta l_1(t) = 0,01$ мм, $\Delta l_2(t) = 18,07$ мм, $\Delta l_3(t) = 12,51$ мм, $\Delta l_4(t) = 0,01$ мм. Максимальные отклонения наблюдаются в момент времени $t = 0,5$ с при меньшей степени полинома.

Результаты

При решении задачи кинематического синтеза рассмотренным методом степень аппроксимирующего полинома во многом зависит от вида и количества граничных условий. Рекомендуется выбирать степень полинома близкой или равной числу разбиений траектории с целью повышения точности полученных результатов. Описанная методика расчета аналитических зависимостей законов изменения управляющих исполнительных звеньев манипулятора параллельно-последовательной структуры позволяет сформировать алгоритм системы управления с обратными связями по положению и скорости.

Заключение

Рассматриваемая кинематическая схема манипулятора-трипода с дополнительным пассивным звеном позволяет обеспечить необходимые параметры манипулятивности и оптимальную конфигурацию манипулятора при переводе его из начального положения в заданное конечное. Конструкция манипулятора более жесткая и позволяет разгрузить линейные привода от изгибающих моментов. Разработана методика решения обратной задачи кинематики манипулятора-трипода с учетом крепления сферических шарниров на выходном звене и отсутствия общей точки пересечения трех исполнительных звеньев. Решена

оптимизационная задача позиционирования манипулятора. Предложен метод решения задачи кинематического синтеза программных перемещений исполнительных приводов, обеспечивающий заданное перемещение характерной точки захвата манипулятора.

Исследование выполнено за счет средств программы развития ВолгГТУ «Приоритет 2030», в рамках научного проекта №25/639-24.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Пономаренко М. В., Андреев Ю.С. Автоматизированные системы управления производством с точки зрения гибких производственных систем. Современное машиностроение. Наука и образование. 2023. С. 314-323.
- [2] Petko, M., Gac, K., Gora, G., Karpel, G., Ochonski, J., Kobus, K. (2016). CNC system of the 5-axis hybrid robot for milling. *Mechatronics*, No. 37, pp. 89-99.
- [3] Lai, Y., Liao, C., Chao, Z. Inverse kinematics for a novel hybrid parallel–serial five-axis machine tool. 2018. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. pp. 63-79.
- [4] Xu, Y., Yang, F., Mei, Y. Kinematic, Workspace and Force Analysis of A Five-DOF Hybrid Manipulator R(2RPR)R/SP+RR. 2022. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. pp. 122-134.
- [5] Wang, L. Fang, Y., Zhang, D. Design of 4-DOF hybrid parallel robots with an integrated three-fingered robot end effector. *Mechanism and Machine Theory*. 2023. pp. 1-21.
- [6] Zhao, Y., Mei, J., Jin, Y., Niu, W. A new hierarchical approach for the optimal design of a 5-dof hybrid serial-parallel kinematic machine. *Mechanism and Machine Theory*. 2021. No.156, pp.104-116.
- [7] Носова Н.Ю., Глазунов В.А., Палочкин С.В., Терехова А.Н. Синтез механизмов параллельной структуры с кинематической развязкой. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2014. С. 34-40.
- [8] Chen, Y., Zhang, Xi., Huang, Y., Wu Y., Ota J. Kinematics optimization of a novel 7-DOF redundant manipulator. *Robotics and Autonomous Systems* (2023). pp. 1-16.
- [9] Воробьева Н.С., Несмиянов И.А, Жога В.В., Дяшкин-Титов В.В., Дяшкин А.В. Исследование манипуляторов параллельно-последовательной структуры на базе трипода: монография. Волгоградский ГАУ. 2022. 272 с.
- [10] Caccavale, F., Siciliano, B., Villani, L. The Tricept robot: dynamics and impedance control .*Transactions on Mechatronics*. 2013. pp. 263-268.

- [11] Жога В.В., Нелюбова А.В., Шаронов Н.Г., Чернышев В.В. П. м. 218886 Российская Федерация, МПК В66С 23/00 Манипулятор-трипод. ФГБОУ ВО ВолгГТУ. 2023.
- [12] Жога В.В., Нелюбова А.В., Шаронов Н.Г., Чернышев В.В. П. м. 218887 Российская Федерация, МПК В66С 23/44 Манипулятор-трипод. ФГБОУ ВО ВолгГТУ. 2023.
- [13] Нелюбова А.В., Жога В.В., Вершинина И.П. Расчет кинематических характеристик манипулятора-трипода с дополнительной кинематической связью. Известия Волгоградского государственного технического университета. 2023. С. 71-76.
- [14] Жога В.В., Нелюбова А.В. Определение кинематических параметров исполнительных приводов для реализации программных траекторий. Известия ВолгГТУ. 2023. С. 26-30.
- [15] Воробьева Н.С., Жога В.В., Несмиянов И.А. Отслеживание приводами манипулятора параллельно-последовательной структуры программных перемещений рабочего органа. Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2019. № 2. С. 154–165.
- [16] Воробьева Н.С., Дяшкин А.В., Дяшкин-Титов В.В. Методы кинематического синтеза алгоритмов управления манипулятором-триподом. Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 2(58). С.384–396.
- [17] Smirnov A.S., Bulov S.A., Smolnikov B.A. Numerical Simulation of Nonlinear Oscillation Modes of a Three-Link Manipulator. 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 45-57.

A.V. Nelyubova, V.V. Zhoga

RESEARCH OF A TECHNOLOGICAL MODULE BASED ON A PARALLEL-SERIAL MANIPULATOR WITH AN ADDITIONAL LINK

Volgograd State Technical University, Russia

Abstract

The paper considers a technological module based on a parallel-serial structure manipulator with an additional passive connection. A special feature of the manipulator, built on the basis of a parallel-sequential structure, is the achievement of significant rigidity and accuracy compared to classical manipulator designs. The paper provides solutions for direct and inverse kinematics problems, and also presents an algorithm for solving the positioning

problem for the output link of the manipulator. The problem of moving the output link of the manipulator along a given trajectory by the method of kinematic synthesis of program movements of the executive links of the manipulator is formulated.

Key words: technological module, parallel-serial manipulator, direct kinematic, inverse kinematic, positioning of the manipulator.

The research was carried out at the expense of the funds of the development program of VSTU "Priority 2030", within the framework of scientific project No. 25/639-24.

REFERENCES

- [1] Ponomarenko M.V., Andreev Yu.S. Automated production management systems from the point of view of flexible production systems. *Modern Mechanical Engineering: Science and Education*. 2023. pp. 314-323. (rus.)
- [2] Petko, M., Gac, K., Gora, G., Karpziel, G., Ochonski, J., Kobus, K. (2016). CNC system of the 5-axis hybrid robot for milling. *Mechatronics*, No. 37, pp. 89-99.
- [3] Lai, Y., Liao, C., Chao, Z. Inverse kinematics for a novel hybrid parallel-serial five-axis machine tool. 2018. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. pp. 63-79.
- [4] Xu, Y., Yang, F., Mei, Y. Kinematic, Workspace and Force Analysis of A Five-DOF Hybrid Manipulator R(2RPR)R/SP+RR. 2022. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. pp.122-134.
- [5] Wang, L. Fang, Y., Zhang, D. Design of 4-DOF hybrid parallel robots with an integrated three-fingered robot end effector. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, pp. 1-21.
- [6] Zhao, Y., Mei, J., Jin, Y., Niu, W. A new hierarchical approach for the optimal design of a 5-dof hybrid serial-parallel kinematic machine. *Mechanism and Machine Theory*. 2021.156, pp.104-116.
- [7] Nosova N.Y., Glazunov V.A., Palochkin S.V., Terekhova A.N. Synthesis of mechanisms of parallel structure with kinematic interchange. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2014. Vol. 43, No. 5. pp. 378-383.
- [8] Chen, Y., Zhang, Xi., Huang, Y., Wu Y., Ota J. Kinematics optimization of a novel 7-DOF redundant manipulator. *Robotics and Autonomous Systems* (2023). pp. 1-16.
- [9] Vorob'eva N.S., Nesmiyanov I.A., Zhoga V.V., Dyashkin-Titov V.V., Dyashkin A.V. Research of manipulators of a parallel-serial structure based on a tripod: monograph. Volgograd State Agricultural University. 2022. 272 p.

- [10] Caccavale, F., Siciliano, B., Villani, L. The Tricept robot: dynamics and impedance control .Transactions on Mechatronics. 2013. pp. 263-268.
- [11] Zhoga V.V., Nelyubova A.V., Sharonov N.G., Chernyshev V.V. Manipulator tripod. U. M. 218886 Russian Federation. Volgograd State Technical University. 2023.
- [12] Zhoga V.V., Nelyubova A.V., Sharonov N.G., Chernyshev V.V. Manipulator tripod. U. M. 218887 Russian Federation. Volgograd State Technical University. 2023.
- [13] Nelyubova A.V., Zhoga V.V., Vershinina I.P. Computation of kinematic characteristics of a manipulator-tripod with additional kinematic coupling. Izvestia VSTU. 2023. pp. 71-76.
- [14] Zhoga V.V., Nelyubova A.V. Determination of kinematic parameters of actuators for the implementation of program trajectories. Izvestia VSTU. 2023. pp. 26-30.
- [15] Vorob'eva, N.S., Nesmiyanov I.A., Zhoga V.V. Program Displacement Tracing of Executive Devices by the Manipulator Drives of Parallel-Sequential Structures. Journal of Computer and Systems Sciences International. 2019. Vol. 58, No. 2. pp. 305-316.
- [16] Vorob'eva N.S., Djashkin A.V., Djashkin-Titov V.V., Ivanov A.G., Fomin S.D. Methods of kinematic synthesis of manipulator-tripod control algorithms. Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and higher professional education. 2020. No. 2(58). pp.384–396.
- [17] Smirnov A.S., Bulov S.A., Smolnikov B.A. Numerical Simulation of Nonlinear Oscillation Modes of a Three-Link Manipulator. 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 45-57.