

УДК 621.01; 531.8; 531.13

Исследование гибридного манипуляционного устройства с пятью степенями свободы для технологических операций

Э.Г. Рашоян, А.К. Алешин, Г.В. Рашоян

ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

Study of a hybrid manipulator with five degrees of freedom for the technological operations

E.G. Rashoyan, A.K. Aleshin, G.V. Rashoyan

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Приведено решение задачи структурного и кинематического анализа нового гибридного манипулятора, состоящего из трехподвижного плоского механизма параллельной структуры, кинематически развязанного одноподвижного механизма последовательной структуры и одноподвижного стола относительного перемещения изделия. Создано и исследовано манипуляционное устройство с повышенными функциональными свойствами для применения в технологических операциях обработки материалов и в аддитивных технологиях. Разработан алгоритм решения обратной задачи о положениях, применение которого продемонстрировано на численном примере. Для исследования функциональных свойств манипуляционного устройства создана его виртуальная модель. Предложен оригинальный алгоритм определения границ рабочей зоны манипуляционного устройства в системе координат стола с учетом геометрических ограничений.

EDN: DZBFDQ, <https://elibrary/dzbfqd>

Ключевые слова: гибридное манипуляционное устройство, кинематический анализ, обратная задача о положениях, рабочая зона, структура 4-RRR

The paper presents a solution to the problem of structural and kinematic analysis of a new hybrid manipulator consisting of the three-motion flat mechanism of the parallel structure, kinematically decoupled single-motion mechanism of the sequential structure, and single-motion table for the device relative displacement. A manipulator with the enhanced functional properties for using in the machining technological operations and additive technologies was created and studied. The paper provides an algorithm for solving the inverse positioning problem; and it is demonstrated using a numerical example. A virtual model was created to study the manipulator functional properties. The paper proposes an original algorithm for determining the manipulator working area boundaries in the table coordinate system taking into account the geometric constraints.

EDN: DZBFDQ, <https://elibrary/dzbfqd>

Keywords: hybrid manipulator, kinematic analysis, inverse positioning problem, working area, 4-RRR structure

Гибридные манипуляторы находят широкое применение в современном технологическом оборудовании, манипуляционных устройствах

и высокоскоростных роботах для выполнения прецизионных технологических операций, при механической обработке материалов [1–4],

а также в медицинских приложениях, например в реабилитационной терапии [5, 6].

Перспективным является применение манипуляторов на финишных операциях при обработке деталей со сложной поверхностью [7], а также в аддитивных технологиях, для работ по лазерной резке и лазерному спеканию металлов. Манипуляторы гибридной структуры обладают повышенными функциональными возможностями. Это — увеличенные габаритные размеры рабочего пространства (например, вдоль одной линейной координаты), высокая маневренность и большая рабочая зона, что позволяет планировать различные траектории, в том числе для обхода особых положений [8, 9].

Выбор механизмов параллельной структуры в манипуляционных устройствах обусловлен наличием замкнутой или рамной конструкции [10], которая повышает жесткость и грузоподъемность относительно собственного веса, точность позиционирования и скорость движения [11]. Такие функциональные свойства связаны с тем, что в механизмах параллельной структуры, подобно фермам, внешняя нагрузка относительно равномерно распределена по кинематическим цепям, а расположение приводов на основании (или ближе к нему) снижает инерционную зависимость механизма от подвижных масс приводов.

Цель работы — создание и исследование гибридного манипуляционного устройства (ГМУ) с повышенными функциональными свойствами для применения в технологических операциях обработки материалов и в аддитивных технологиях.

Описание ГМУ. ГМУ с пятью степенями свободы включает в себя плоский механизм параллельной структуры 4-RRR с тремя степенями свободы (R-вращательная пара) с одной избыточной кинематической цепью, кинематически развязанный механизм последовательной структуры с одной вращательной степенью свободы и одноподвижный стол относительно перемещения для обеспечения изделию линейного перемещения. Внешний вид ГМУ приведен на рис. 1.

ГМУ содержит основание 1, платформы 2, соединенные четырьмя идентичными плоскими кинематическими цепями $A_1B_1C_1$, $A_2B_2C_2$, $A_3B_3C_3$ и $A_4B_4C_4$, в состав которых входят промежуточные звенья 3–10, связанные вращательными парами. Для описания движения звеньев ГМУ введена неподвижная система координат $OXYZ$, начало которой расположено на пересечении диагоналей прямоугольника $A_1A_2A_3A_4$ (точки крепления кинематических цепей на основании). Оси всех вращательных пар (R) параллельны друг другу и перпендикулярны плоскости YOZ .

Четыре кинематические цепи попарно расположены в двух параллельных плоскостях (образуют два слоя). На платформе 2 имеется кривошип — выходное звено (далее исполнительное звено) 11, где установлен режущий инструмент или лазерная головка, подвижно соединенная с платформой соосно расположенными вращательными парами (R). Ось вращательного исполнительного звена лежит в плоскости YOZ .

Исполнительное звено совершает возвратно-поворотные движения благодаря действию

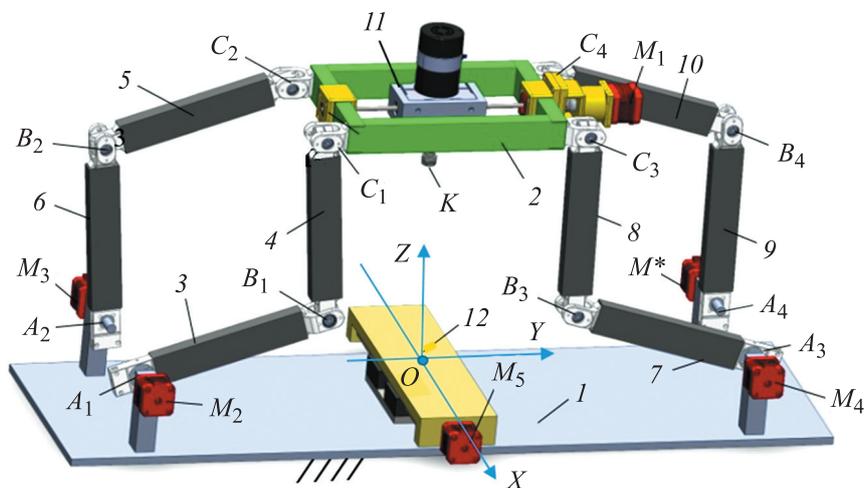


Рис. 1. Внешний вид ГМУ

привода M_1 . Другие приводы механизма параллельной структуры обозначены как M_1, M_2, M_3 и M^* , где M^* — привод избыточной цепи ГМУ. Избыточная кинематическая цепь придает механизму повышенную жесткость и устойчивость, а также симметричность расположения кинематических цепей. В состав ГМУ также входит подвижный стол 12 с приводом M_5 . Ось движения подвижного стола совпадает с осью OX абсолютной системы координат и обеспечивает поступательное движение изделию (обрабатываемой детали), закрепленному на этом столе.

Точка K , обозначенная на рис. 1, является точкой выхода лазерного луча. Гибридная структура манипуляционного устройства позволяет достичь заданного положения точки K исполнительного звена двумя поступательными перемещениями вдоль осей OY и OZ , а также поступательным перемещением изделия со столом вдоль оси OX в системе координат $OXYZ$. Заданная угловая ориентация исполнительного звена достигается двумя вращательными движениями вокруг осей OX и OY .

Таким образом, ГМУ обладает пятью степенями подвижности, из которых четыре принадлежат плоскому механизму параллельно-последовательной структуры, а пятая — одноподвижному столу линейного перемещения.

Решение обратной задачи кинематики. Решение обратной задачи о положениях состоит в определении управляющих воздействий со стороны приводов, реализующих заданные траектории исполнительного звена.

Известны различные подходы к решению обратной задачи кинематического анализа манипуляторов гибридной структуры [12–14].

Будем применять геометрический подход, так как составляющие механизмы ГМУ функционируют во взаимно ортогональных плоскостях, что упрощает кинематический анализ.

Постановка задачи. Кинематическая схема ГМУ приведена на рис. 2, где введены следующие обозначения:

- q_1 — приводная координата вращательного движения кинематически развязанного механизма последовательной структуры;
- q_i — приводные координаты вращательного движения механизма параллельной структуры, $i = 2, 4$;

- q^* — приводная координата вращательного движения избыточной цепи механизма параллельной структуры;

- q_5 — приводная координата поступательного движения стола;

- $OXYZ$ — неподвижная система координат, связанная с основанием механизма параллельной структуры (рис. 2, а);

- $SX_S Y_S Z_S$ — подвижная система координат, связанная со столом (рис. 2, б) и способная смещаться вдоль оси OX ;

- $PX_P Y_P Z_P$ — подвижная система координат с началом в точке P исполнительного звена, в которой ось PZ_P направлена по оси исполнительного инструмента, по отрезку KP , а ось PY_P совпадает с осью вращения исполнительного звена.

Также заданы декартовы координаты точек крепления A_1, A_2, A_3, A_4 четырех кинематических цепей к основанию в неподвижной системе координат $OXYZ$. Длины всех промежуточных звеньев и длина подвижной платформы равны l (см. рис. 2).

Положение исполнительного звена задано декартовыми координатами точки K в системе координат стола $SX_S Y_S Z_S$ и углами ориентации α и β вектора $\mathbf{K}_P = [0, 0, -h]^T$, лежащего на оси PZ_P подвижной системы координат $PX_P Y_P Z_P$ исполнительного звена, где h — заданная длина исполнительного звена. Угол α образован в результате поворота платформы вокруг оси SX_S (см. рис. 2, а), а угол β — путем поворота исполнительного звена вокруг повернутой оси SY_S .

Таким образом, заданы входные координаты исполнительного звена относительно подвижной системы координат стола $SX_S Y_S Z_S$.

Алгоритм решения обратной задачи о положениях, заключающийся в определении приводных координат q_i ($i = \overline{1,5}$) и q^* , включает в себя следующие шаги.

Определение приводной координаты q_1 . Так как привод M_1 установлен на валу исполнительного звена и вращает его, приводная координата q_1 соответствует углу β поворота кинематически развязанного механизма последовательной структуры (см. рис. 2, б). Следовательно,

$$q_1 = \beta. \quad (1)$$

Для управления трехподвижной платформой предназначены приводы M_2, M_3, M_4 и M^* (см. рис. 1). Приводные координаты q_i ($i = 2, 4$)

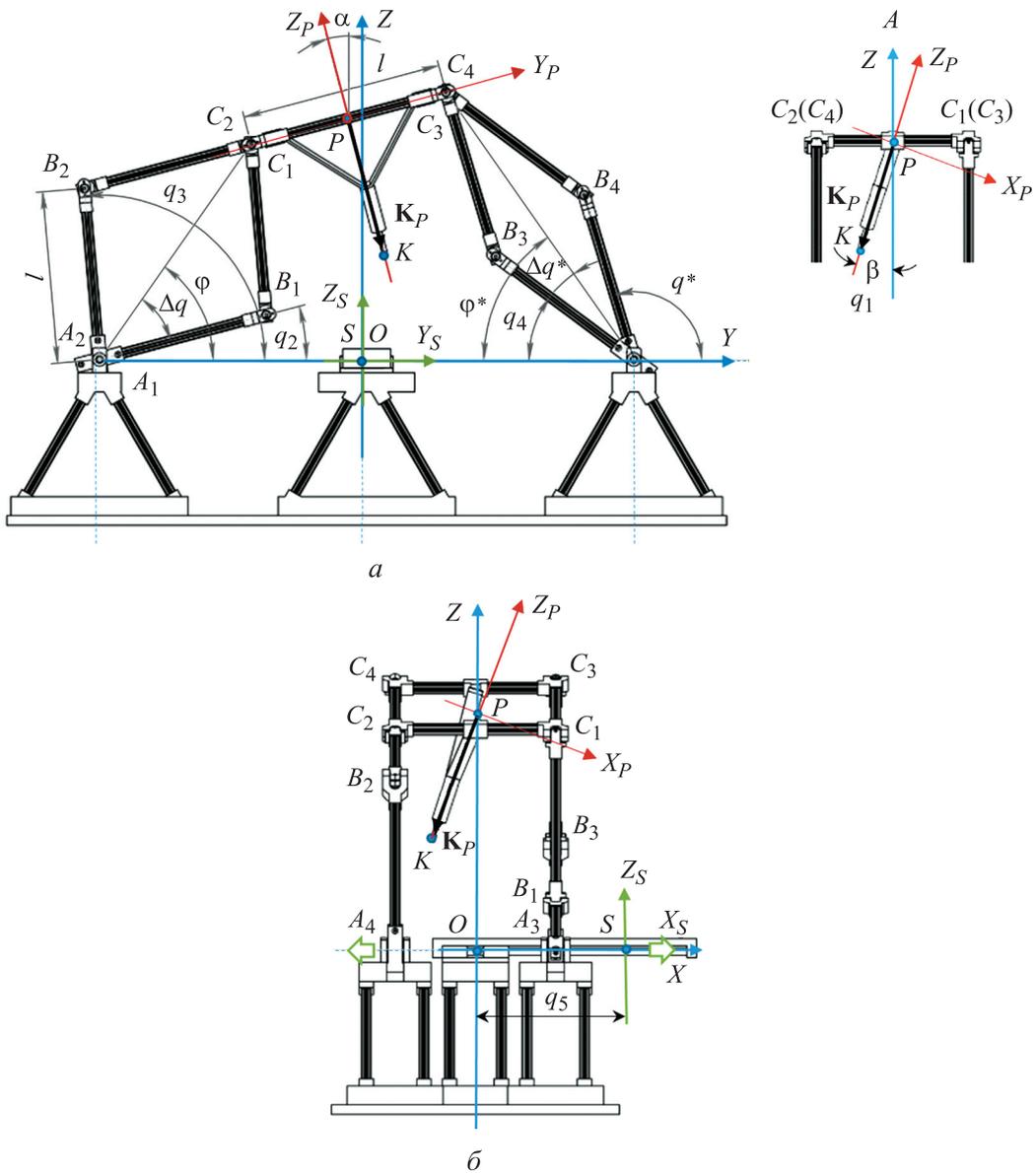


Рис. 2. Кинематическая схема ГМУ

и q^* зависят от положения точки P крепления исполнительного инструмента на валу платформы в неподвижной системе координат $OXYZ$ и угла ориентации α платформы. На приводную координату q_5 (привод M_5) влияет взаимное расположение систем координат $OXYZ$ и $SX_S Y_S Z_S$ по оси OX .

Определение приводной координаты q_5 и декартовых координат точки P в неподвижной координатной системе $OXYZ$ (см. рис. 2). Для упрощения дальнейших расчетов (без потери точности) механизм параллельной структуры рассматриваем как плоский механизм, звенья которого расположены в плоскости YOZ . Тогда принимаем $x_{A_i} = x_{B_i} = x_{C_i} = 0$ ($i = 1, 4$).

Для решения поставленной задачи составляем векторное равенство, связывающее координаты вектора точки K в двух системах координат $OXYZ$ и $SX_S Y_S Z_S$ (рис. 3):

$$\mathbf{r}_{OS} + \mathbf{r}_{SK} = \mathbf{P}_O + \mathbf{K}_S, \quad (2)$$

где \mathbf{r}_{OS} — вектор точки S в неподвижной системе координат, $\mathbf{r}_{OS} = [q_5 \ 0 \ 0]^T$; \mathbf{r}_{SK} — вектор, описывающий положение точки K исполнительного звена в системе координат $SX_S Y_S Z_S$ стола ГМУ; $\mathbf{r}_{SK} = [x_K \ y_K \ z_K]^T$; \mathbf{P}_O — вектор точки P в неподвижной системе координат, $\mathbf{P}_O = [x_P \ y_P \ z_P]^T$; \mathbf{K}_S — преобразованный вектор \mathbf{K}_P из системы координат $PX_P Y_P Z_P$ в систему координат $SX_S Y_S Z_S$.

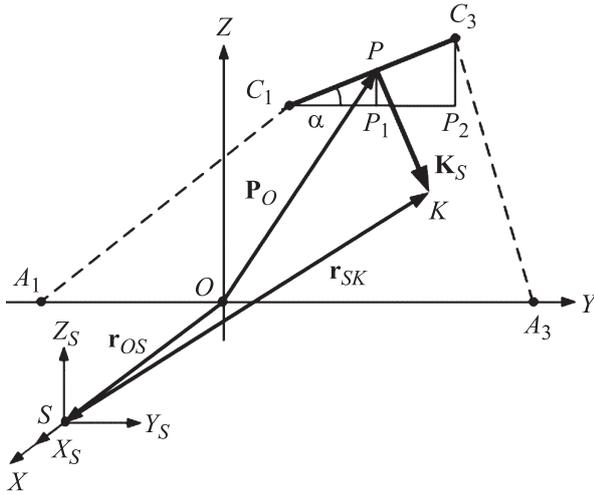


Рис. 3. Графическое представление векторного равенства (2)

Координаты векторов r_{OS} и P_O неизвестны и подлежат определению в неподвижной системе координат $OXYZ$. Векторы r_{SK} и K_S являются известными величинами.

Координаты вектора K_S в системе координат $SX_sY_sZ_s$ находим из матричного соотношения

$$K_S = R_{XS}(\alpha)R_{YS}(\beta)K_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -h \end{bmatrix},$$

где $R_{XS}(\alpha)$ и $R_{YS}(\beta)$ — матрицы поворота вокруг координатных осей SX_s и SY_s .

Левая часть уравнения (2) имеет вид

$$r_{OS} + r_{SK} = \begin{bmatrix} q_5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_K \\ y_K \\ z_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_5 + x_K \\ y_K \\ z_K \end{bmatrix}. \quad (3)$$

С учетом того, что $x_P = 0$ (так как вектор K_S расположен в плоскости YOZ), правая часть уравнения (2) принимает следующий вид:

$$P_O + K_S = \begin{bmatrix} 0 \\ y_P \\ z_P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -h \sin \beta \\ h \sin \alpha \cos \beta \\ -h \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -h \sin \beta \\ y_P + h \sin \alpha \cos \beta \\ z_P - h \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Приравняв правые части уравнений (3) и (4) и решая относительно неизвестных координат y_P, z_P, q_5 , находим координаты точки P платформы и приводную координату q_5 в системе координат $OXYZ$:

$$\begin{aligned} q_5 &= -x_K - h \sin \beta; \\ y_P &= y_K - h \sin \alpha \cos \beta; \\ z_P &= z_K + h \cos \alpha \cos \beta. \end{aligned}$$

Определение приводных координат q_2, q_3, q_4 и q^* . Из условия геометрического подобия треугольников $\Delta C_1PP_1 \sim \Delta C_1C_3P_2$ для координат точек C_1 и C_3 (см. рис. 3) получаем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} y_{C1} &= y_P - \frac{l}{2} \cos \alpha; & z_{C1} &= z_P - \frac{l}{2} \sin \alpha; \\ y_{C3} &= y_P + \frac{l}{2} \cos \alpha; & z_{C3} &= z_P + \frac{l}{2} \sin \alpha. \end{aligned}$$

С помощью этих соотношений находим длины отрезков l_{A1C1} и l_{A3C3} по формулам

$$l_{A1C1} = \sqrt{(y_{A1} - y_{C1})^2 + (z_{A1} - z_{C1})^2};$$

$$l_{A3C3} = \sqrt{(y_{A3} - y_{C3})^2 + (z_{A3} - z_{C3})^2}.$$

Кинематические цепи $A_1B_1C_1$ и $A_2B_2C_2$, а также $A_3B_3C_3$ и $A_4B_4C_4$ (см. рис. 2) в плоскости YOZ образуют ромбы, у которых длины всех сторон (звеньев) равны друг другу. Известно, что противоположные углы у ромбов равны, а диагонали являются биссектрисами соответствующих углов и перпендикулярны между собой. Следовательно, углы Δq и Δq^* определяются из теоремы косинусов (см. рис. 2, а):

$$\Delta q = \arccos \frac{l_{A1C1}}{2l}; \quad \Delta q^* = \arccos \frac{l_{A3C3}}{2l}.$$

Тогда приводные координаты

$$\begin{cases} q_2 = \varphi - \Delta q; \\ q_3 = \varphi + \Delta q; \\ q_4 = \varphi^* + \Delta q^*; \\ q^* = \varphi - \Delta q^*, \end{cases} \quad (5)$$

где

$$\varphi = \arctg 2(z_{C1}, y_{C1}); \quad \varphi^* = \arctg 2(z_{C3}, y_{C3}).$$

Таким образом, обратная задача кинематики решена. Установлены аналитические зависимости (1) и (5) между приводными $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q^*$ и абсолютными $x_K, y_K, z_K, \alpha, \beta$ координатами исполнительного звена. Полученные данные позволяют построить рабочую зону ГМУ.

Методика определения границ рабочей зоны ГМУ. Для определения границ рабочей зоны воспользуемся методом дискретизации пространства по заданной сетке [15, 16].

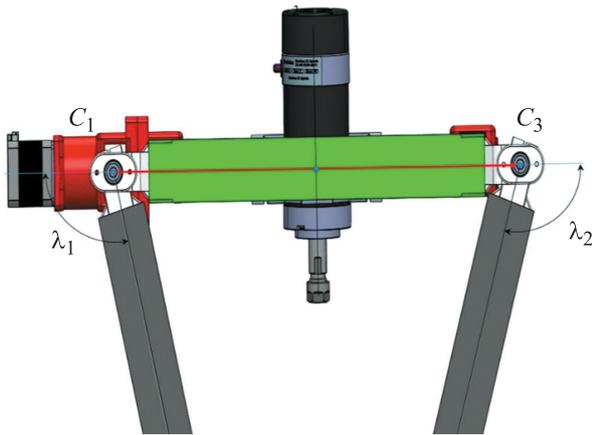


Рис. 4. Модель угловых ограничений во вращательных парах выходного звена

В системе координат стола зададимся параллелепипедом, размеры которого сопоставимы с диапазонами изменения линейных координат характерной точки K : $x_{\min} \leq x_K \leq x_{\max}$, $y_{\min} \leq y_K \leq y_{\max}$, $z_{\min} \leq z_K \leq z_{\max}$, а также углами ориентации выходного звена $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$, $\beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max}$. Здесь и далее индексы «min» и «max» соответствуют минимальному и максимальному значениям параметров.

Для построения рабочей зоны ГМУ необходимо разбить параллелепипед на равноотстоящие точки по сетке. В каждой точке внутри параллелепипеда перебираются углы ориентации исполнительного звена ГМУ с проверкой ограничений. Точность расчетов будет зависеть от выбранного шага сканирования по всем абсолютным координатам.

В качестве ограничений выступают допускаемые углы сближения и расхождения кинематических цепей в составе ромбов плоского механизма (см. рис. 2, а). Поэтому в каждой точке сетки рабочего пространства проверяются ограничения на углы $\angle A_i B_i C_i$ ($i=1,4$) в вращательных парах между звеньями одной кинематической цепи для двух ромбов, а также конструктивные ограничения во вращательных парах кинематических цепей с платформой (рис. 4): $\lambda_{\max} \leq \lambda_j \leq \lambda_{\min}$ ($j=1,4$), где λ_{\min} и λ_{\max} задаются исходя из конструктивных соображений.

Численный пример решения задач о положениях. Пусть в неподвижной системе координат $OXYZ$ заданы координаты точек вращательных шарниров на основании, мм: $A_1(0, -60, 0)$, $A_2(0, -60, 0)$, $A_3(0, 60, 0)$ и $A_4(0, 60, 0)$. Длины звеньев l и платформы равны 40 мм, длина исполнительного звена h — 10 мм. Известны также диапазоны изменения абсолютных координат точки K исполнительного звена ГМУ в системе координат стола $SX_S Y_S Z_S$:

$$x_{\min} = -20 \text{ мм}; x_{\max} = 20 \text{ мм};$$

$$y_{\min} = -30 \text{ мм}; y_{\max} = 30 \text{ мм};$$

$$z_{\min} = -20 \text{ мм}; z_{\max} = 20 \text{ мм};$$

$$\alpha_{\min} = -20^\circ; \alpha_{\max} = 20^\circ; \beta_{\min} = -5^\circ; \beta_{\max} = 5^\circ.$$

Для линейных координат шаг сканирования $\Delta x_K = \Delta y_K = \Delta z_K = 0,5$ мм, для угловых координат — $\Delta \alpha = \Delta \beta = 1^\circ$.

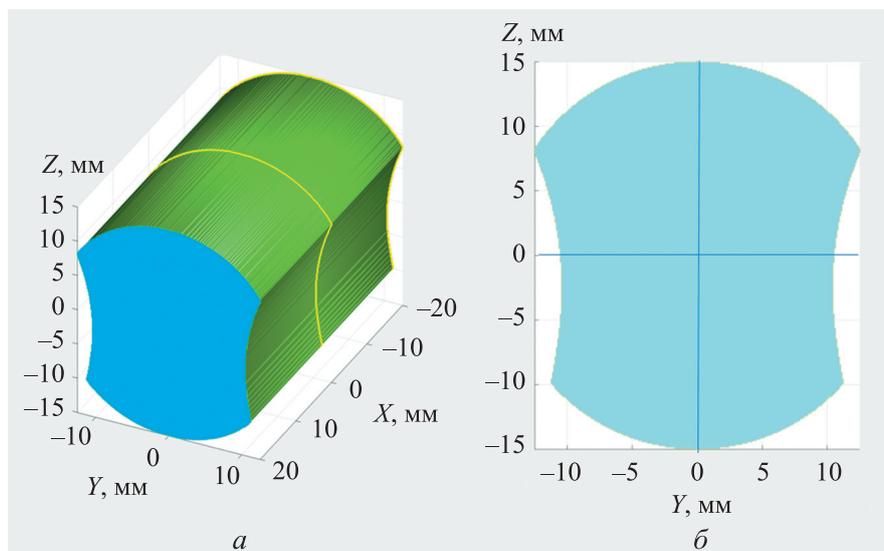


Рис. 5. Результаты определения границ рабочей зоны ГМУ в виде замкнутой области (а) и в проекции на плоскость YOZ

В среде MATLAB проведены численные эксперименты, подтвердившие работоспособность алгоритма определения границ рабочей зоны. В результате численного эксперимента получены границы рабочей зоны ГМУ в виде замкнутой области (рис. 5, а), точки которой принадлежат рабочей зоне ГМУ. Вид рабочей зоны в проекции на плоскость YOZ показан на рис. 5, б.

В качестве примера решим обратную задачу кинематики, т. е. определим приводные координаты приводов по заданной траектории исполнительного звена. Последняя соответствует движению исполнительного звена по поверхности цилиндра радиусом $R = 15$ мм, ось которого направлена по координатной оси OX:

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_{\min} + N\Delta\alpha; \\ \beta = 3^\circ; \\ x = x_{\min} + N\Delta x; \\ y = R \cos \alpha; \\ z = R \sin \alpha, \end{cases} \quad (6)$$

где N — шаг, заданный по абсолютным координатам (в частном случае в качестве шага N можно принять интервал времени).

Траектория обработанной поверхности цилиндра радиусом $R = 15$ мм, построенная в соответствии с системой уравнений (6), показана на рис. 6.

Зависимости приводных координат от шага движения N приведены на рис. 7. В дальнейшем полученные зависимости позволят решать задачи кинематического управления, а также задачи о скоростях, ускорениях и об особых положениях механизма.

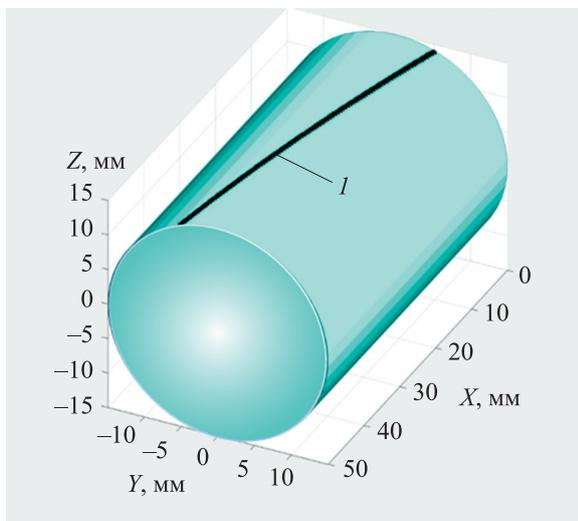


Рис. 6. Траектория обработанной поверхности цилиндра радиусом $R = 15$ мм (1 — траектория обработки)

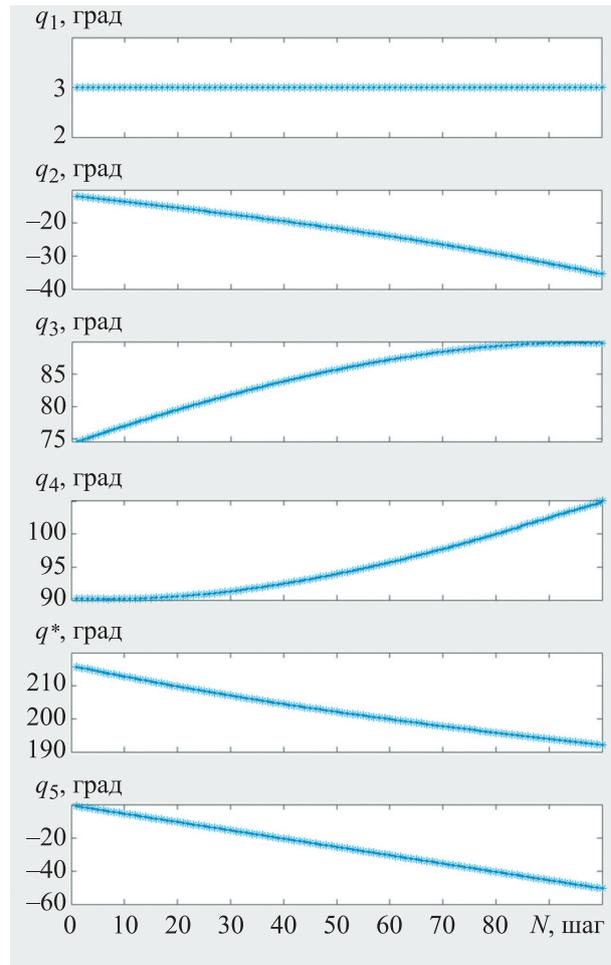


Рис. 7. Зависимости приводных координат q_1-q_5 и q^* от шага движения N

Рассмотренный численный пример подтверждает работоспособность предложенных алгоритмов. Методика решения обратной задачи может быть адаптирована к анализу подобных манипуляторов гибридной структуры.

Следует отметить, что из-за структурных и геометрических особенностей исследованного ГМУ обратная задача о положениях была успешно решена благодаря введению дополнительных систем координат. Это позволило получить достаточно эффективный и простой алгоритм.

Выводы

1. Разработано ГМУ с повышенными функциональными свойствами.
2. Предложены алгоритм решения обратной задачи о положениях и методика определения границ рабочей зоны ГМУ, работоспособность которых проверена на численных примерах.

Литература

- [1] Russo M., Zhang D., Liu X.J. et al. A review of parallel kinematic machine tools: design, modeling, and applications. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2024, vol. 196, art. 104118, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2024.104118>
- [2] Ganiev R.F., Glazunov V.A., Filippov G.S. Urgent problems of machine science and ways of solving them: wave and additive technologies, the machine tool industry, and robot surgery. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2018, vol. 47, no. 5, pp. 399–406, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618818050059>
- [3] Carbone G., Ceccarelli M. A stiffness analysis for a hybrid parallel-serial manipulator. *Robotica*, 2004, vol. 22, no. 5, pp. 567–576, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574704000323>
- [4] Qin X., Li Y., Feng G. et al. A novel surface topography prediction method for hybrid robot milling considering the dynamic displacement of end effector. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2024, vol. 130, no. 7–8, pp. 3495–3508, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12814-y>
- [5] Lin C., Guang C., Zheng Y. et al. Preliminary evaluation of a novel vision-guided hybrid robot system for capsulotomy in cataract surgery. *Displays*, 2022, vol. 74, art. 102262, doi: <https://doi.org/10.1016/j.displa.2022.102262>
- [6] Tao B., Feng Y., Fan X. et al. The accuracy of a novel image-guided hybrid robotic system for dental implant placement: an in vitro study. *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg.*, 2023, vol. 19, no. 1, art. e2452, doi: <https://doi.org/10.1002/rcs.2452>
- [7] Oba Y., Kakinuma Y. Simultaneous tool posture and polishing force control of unknown curved surface using serial-parallel mechanism polishing machine. *Precis. Eng.*, 2017, vol. 49, pp. 24–32, doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.01.006>
- [8] Liu Q., Huang T. Inverse kinematics of a 5-axis hybrid robot with non-singular tool path generation. *Robot. Comp. Integ. Manuf.*, 2019, vol. 56, pp. 140–148, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.06.003>
- [9] Wen K., Harton D., Lalibert'e T. et al. Kinematically redundant (6+3)-dof hybrid parallel robot with large orientational workspace and remotely operated gripper. *IEEE ICRA*, 2019, pp. 1672–1678, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793772>
- [10] Glazunov V., Filippov G., Rashoyan G. et al. Analysis of mechanisms with parallel-serial structure 5-DOF and extended working area. In: *Electromechanics and robotics. Springer Singapore*, 2021, pp. 3–12, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_1
- [11] Norton C., ed. *Parallel manipulators*. Nova, 2016. 181 p.
- [12] Waldron K.J., Raghavan M., Roth B. Kinematics of a hybrid series-parallel manipulation system. *J. Dyn. Sys. Meas. Control.*, 1989, vol. 111, no. 2, pp. 211–221, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3153039>
- [13] Антонов А.В., Фомин А.С. Решение обратной кинематической задачи для пятиподвижного манипулятора гибридной структуры. *Автоматика и телемеханика*, 2023, № 3, с. 106–125, doi: <https://doi.org/10.31857/S0005231023030054>
- [14] Cheng H.H. Real-time manipulation of a hybrid serial-and-parallel-driven redundant industrial manipulator. *J. Dyn. Sys. Meas. Control.*, 1994, vol. 116, no. 4, pp. 687–701, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2899268>
- [15] Vo D.T., Kheylo S.V., Rashoyan G.V. et al. Research on the mechanism of parallel structure with circular guide. *IJMERR*, 2024, vol. 13, no. 4, pp. 442–447, doi: <https://doi.org/10.18178/ijmerr.13.4.442-447>
- [16] Хейло С.В., Степнов Н.В., Огибин С.Ю. и др. Структурный и кинематический анализ манипуляционного механизма технологического назначения. *Справочник. Инженерный журнал с приложением*, 2025, № 1, с. 22–28, doi: <https://doi.org/10.14489/hb.2025.01.pp.022-028>

References

- [1] Russo M., Zhang D., Liu X.J. et al. A review of parallel kinematic machine tools: design, modeling, and applications. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2024, vol. 196, art. 104118, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2024.104118>

- [2] Ganiev R.F., Glazunov V.A., Filippov G.S. Urgent problems of machine science and ways of solving them: wave and additive technologies, the machine tool industry, and robot surgery. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2018, vol. 47, no. 5, pp. 399–406, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618818050059>
- [3] Carbone G., Ceccarelli M. A stiffness analysis for a hybrid parallel-serial manipulator. *Robotica*, 2004, vol. 22, no. 5, pp. 567–576, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574704000323>
- [4] Qin X., Li Y., Feng G. et al. A novel surface topography prediction method for hybrid robot milling considering the dynamic displacement of end effector. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2024, vol. 130, no. 7–8, pp. 3495–3508, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12814-y>
- [5] Lin C., Guang C., Zheng Y. et al. Preliminary evaluation of a novel vision-guided hybrid robot system for capsulotomy in cataract surgery. *Displays*, 2022, vol. 74, art. 102262, doi: <https://doi.org/10.1016/j.displa.2022.102262>
- [6] Tao B., Feng Y., Fan X. et al. The accuracy of a novel image-guided hybrid robotic system for dental implant placement: an in vitro study. *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg.*, 2023, vol. 19, no. 1, art. e2452, doi: <https://doi.org/10.1002/rcs.2452>
- [7] Oba Y., Kakinuma Y. Simultaneous tool posture and polishing force control of unknown curved surface using serial-parallel mechanism polishing machine. *Precis. Eng.*, 2017, vol. 49, pp. 24–32, doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.01.006>
- [8] Liu Q., Huang T. Inverse kinematics of a 5-axis hybrid robot with non-singular tool path generation. *Robot. Comp. Integ. Manuf.*, 2019, vol. 56, pp. 140–148, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.06.003>
- [9] Wen K., Harton D., Lalibert'e T. et al. Kinematically redundant (6+3)-dof hybrid parallel robot with large orientational workspace and remotely operated gripper. *IEEE ICRA*, 2019, pp. 1672–1678, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793772>
- [10] Glazunov V., Filippov G., Rashoyan G. et al. Analysis of mechanisms with parallel-serial structure 5-DOF and extended working area. In: *Electromechanics and robotics. Springer Singapore*, 2021, pp. 3–12, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_1
- [11] Norton C., ed. *Parallel manipulators*. Nova, 2016. 181 p.
- [12] Waldron K.J., Raghavan M., Roth B. Kinematics of a hybrid series-parallel manipulation system. *J. Dyn. Sys. Meas. Control.*, 1989, vol. 111, no. 2, pp. 211–221, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3153039>
- [13] Antonov A.V., Fomin A.S. Inverse kinematics of a 5-DOF hybrid manipulator. *Avtomatika i telemekhanika*, 2023, no. 3, pp. 106–125, doi: <https://doi.org/10.31857/S0005231023030054> (in Russ.). (Eng version: *Autom. Remote Control.*, 2023, vol. 84, no. 3, pp. 281–293, doi: <https://doi.org/10.1134/S0005117923030037>)
- [14] Cheng H.H. Real-time manipulation of a hybrid serial-and-parallel-driven redundant industrial manipulator. *J. Dyn. Sys., Meas., Control.*, 1994, vol. 116, no. 4, pp. 687–701, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2899268>
- [15] Vo D.T., Kheylo S.V., Rashoyan G.V. et al. Research on the mechanism of parallel structure with circular guide. *IJMERR*, 2024, vol. 13, no. 4, pp. 442–447, doi: <https://doi.org/10.18178/ijmerr.13.4.442-447>
- [16] Kheylo S.V., Stepnov N.V., Ogibin S.Yu. et al. Structural and kinematical analysis of new mechanisms of parallel structure of technological purpose. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem* [Handbook. An Engineering Journal], 2025, no. 1, pp. 22–28, doi: <https://doi.org/10.14489/hb.2025.01.pp.022-028> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 04.07.2025

Информация об авторах

РАШОЯН Эдгар Гагикович — аспирант лаборатории теории механизмов и структуры машин. ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: rashoyan.edgar@gmail.com).

АЛЕШИН Александр Константинович — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории теории механизмов и структуры машин. ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: aleshin_ak@mail.ru).

РАШОЯН Гагик Володяевич — доктор технических наук, старший научный сотрудник лаборатории теории механизмов и структуры машин. ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: gagik_r@bk.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Рашоян Э.Г., Алешин А.К., Рашоян Г.В. Исследование гибридного манипуляционного устройства с пятью степенями свободы для технологических операций. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 8, с. 21–30.

Please cite this article in English as:

Rashoyan E.G., Aleshin A.K., Rashoyan G.V. Study of a hybrid manipulator with five degrees of freedom for the technological operations. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 8, pp. 21–30.

Information about the authors

RASHOYAN Edgar Gagikovich — Postgraduate, Laboratory of Theory of Mechanisms and Machine Structure. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, M. Kharitonyevskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: rashoyan.edgar@gmail.com).

ALESHIN Aleksandr Konstantinovich — Doctor of Science (Eng.), Leading Researcher, Laboratory of Theory of Mechanisms and Machine Structure. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, M. Kharitonyevskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: aleshin_ak@mail.ru).

RASHOYAN Gagik Volodyaevich — Doctor of Science (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Theory of Mechanisms and Machine Structure. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, M. Kharitonyevskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: gagik_r@bk.ru).



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие

«Физическая химия»

Авторы: А.Л. Петелин, А.А. Новиков

Представлено краткое изложение курса физической химии, традиционно читаемого в технических университетах. Кроме теоретического материала в пособие включены примеры конкретных задач с решениями для лучшего освоения практических приемов использования теории.

Для бакалавров и специалистов, обучающихся по направлениям «Материаловедение и технология материалов» (22.03.01), «Ядерные реакторы и материалы» (14.05.01), а также для слушателей программы обучения «Материаловедение и технология материалов».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>