

РАБОЧАЯ ЗОНА МАНИПУЛЯТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ТРЕМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

WORKSPACE OF THE PARALLEL STRUCTURE MANIPULATOR WITH THREE DEGREES OF FREEDOM

П.А. ЛАРЮШКИН, С.В. ПАЛОЧКИН
P.A. LARYUSHKIN, S.V. PALOCHKIN

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина)
(Moscow State Textile University "A.N. Kosygin")
E-mail: office@msta.ac.ru

Рассмотрена рабочая зона манипулятора параллельной структуры с тремя степенями свободы с учетом особых положений. Приведена визуализация рабочего объема в трехмерном пространстве.

A workspace of parallel structure manipulator with three degrees of freedom regarding its singularity has been considered. Visualization of the workspace in three-dimension space is given herein.

Ключевые слова: манипуляционный механизм, параллельная структура, рабочая зона, особые положения.

Keywords: a manipulation mechanism, parallel structure, workspace, singularity.

Уже многие годы промышленные роботы и манипуляторы, в основном последовательной структуры с различным числом степеней свободы, широко используются при автоматизации технологических и транспортных операций на предприятиях текстильной и легкой промышленности [1].

При этом в последнее время все большее практическое применение в качестве

исполнительных органов разнообразных машин находят также манипуляционные механизмы параллельной структуры, имеющие жесткую конструкцию с легкими звеньями, которая позволяет увеличить быстродействие и точность позиционирования манипулятора [2].

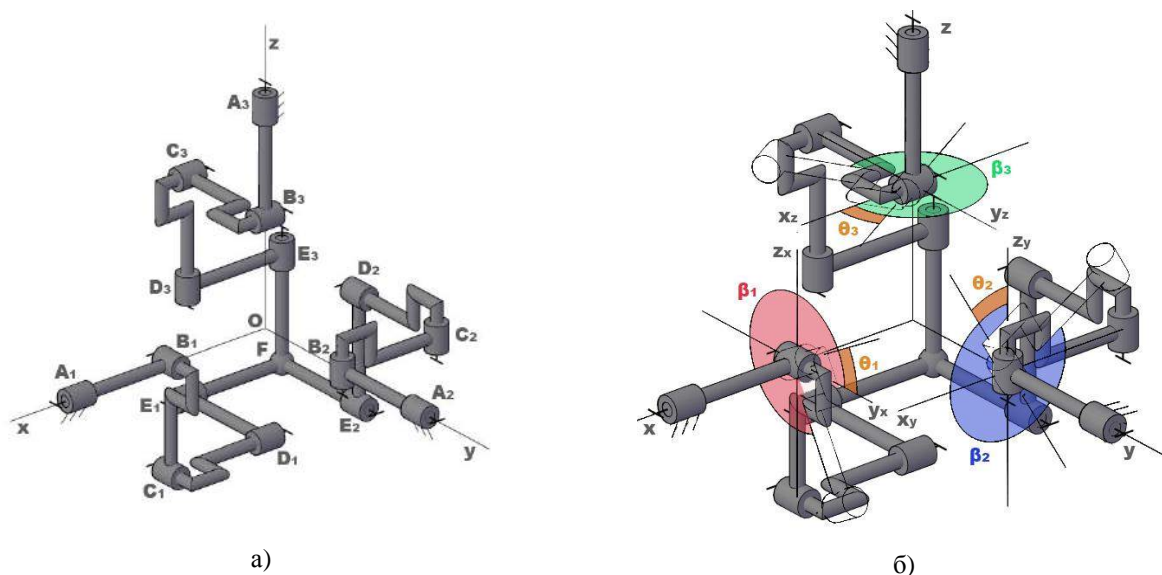


Рис. 1

Однако при разработке таких механизмов возникает ряд проблем, одна из которых связана с анализом рабочей зоны манипулятора с учетом особых положений, в которых он теряет управляемость [3]. Именно решению данной задачи для разработанной авторами новой конструкции манипулятора параллельной структуры с

тремя степенями свободы (рис. 1 – кинематическая (а) и расчетная (б) схемы механизма) и посвящена настоящая работа.

Для рассматриваемого механизма (рис. 1-а) уравнения связи, то есть зависимости, связывающие обобщенные и абсолютные координаты, имеют вид:

$$\begin{aligned} & \left(y - \sqrt{1 - \left(\frac{x+}{\ell} \right)^2} \cos \left(\theta_1 - \frac{\pi}{2} \right) \right)^2 + \left(z - \sqrt{1 - \left(\frac{x+}{\ell} \right)^2} \sin \left(\theta_1 - \frac{\pi}{2} \right) \right)^2 - \ell^2 = 0, \\ & \left(z - \sqrt{1 - \left(\frac{y+}{\ell} \right)^2} \cos \left(\theta_2 - \frac{\pi}{2} \right) \right)^2 + \left(x - \sqrt{1 - \left(\frac{y+}{\ell} \right)^2} \sin \left(\theta_2 - \frac{\pi}{2} \right) \right)^2 - \ell^2 = 0, \\ & \left(x - \sqrt{1 - \left(\frac{z+}{\ell} \right)^2} \cos \left(\theta_3 - \frac{\pi}{2} \right) \right)^2 + \left(y - \sqrt{1 - \left(\frac{z+}{\ell} \right)^2} \sin \left(\theta_3 - \frac{\pi}{2} \right) \right)^2 - \ell^2 = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где обобщенными координатами являются углы поворота $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ (рис. 1-б) входных звеньев A_iB_i ($i=1, 2, 3$), а абсолютными координатами – координаты x, y, z выходного звена F (рис. 1-а). Принадлежность координат точки выходного звена рабочей зоне манипулятора определяется существованием в этой точке решения системы уравнений (1). Выполненный в системе MATLAB компьютерный анализ возможных решений данной системы уравнений показал, что они существуют при значениях x, y, z , лежащих в интервале $[-2\ell; 0]$, где

ℓ – длина звеньев B_iC_i механизма. Таким образом, объем рабочей зоны механизма будет ограничен указанным интервалом по каждой координате.

Для того чтобы наглядно представить форму рабочей зоны, необходимо рассмотреть геометрическое место точек – возможных положений выходного звена.

На рис. 2 представлены поверхности (а) и объемы (б, в) возможных положений выходного звена механизма).

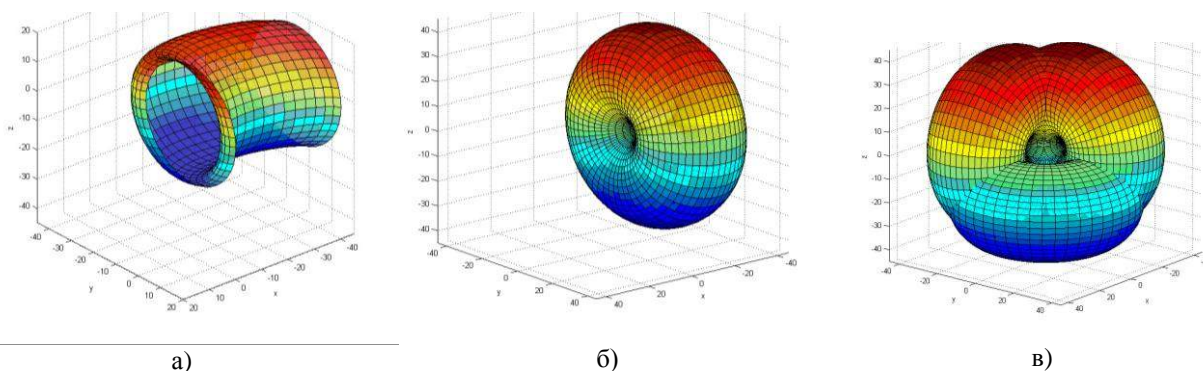


Рис. 2

Для каждого значения входного угла θ_i одна кинематическая цепь манипулятора ограничивает возможные координаты его

выходного звена поверхностью, аналогичной представленной на рис. 2-а. Тогда при изменении угла θ_i в пределах $[0; 2\pi]$ множе-

ство точек, характеризующих положение выходного звена, допускаемое одной кинематической цепью, будет заключено в объеме, получаемом при вращении этой поверхности вокруг соответствующей оси. Такая поверхность будет представлять собой тор, образованный вращением центра окружности радиуса $R=\ell$ по окружности того же радиуса, вокруг оси, совпадающей, например, с осью первой кинематической пары цепи (рис. 2-б). Для того чтобы охарактеризовать множество возможных положений выходного звена для всего механизма, необходимо для каждой из трех кинематических цепей построить аналогичные поверхности. Тогда объем, ограниченный одновременно всеми тремя поверхностями, и будет соответствовать всем возможным положениям выходного звена, то есть форме рабочей зоны механизма (рис. 2-в).

Анализ возможных положений выходного звена манипулятора показал, что графики поверхностей, представленные на рис. 2-б, идентичны для каждой кинематической цепи. Кроме того, размер каждой из этих поверхностей определяется только значением параметра ℓ . Поэтому и размер всей рабочей зоны манипулятора будет определяться только величиной ℓ .

Для визуального представления объема рабочей зоны был осуществлен компьютерный перебор всех точек с координатами в интервале $[-2\ell; 0]$, по каждой из осей координат с шагом $t=0,0251$, достаточным, как показала практика, для получения адекватного отображения рабочего объема. При этом каждая из точек проверялась на принадлежность рабочей зоне.

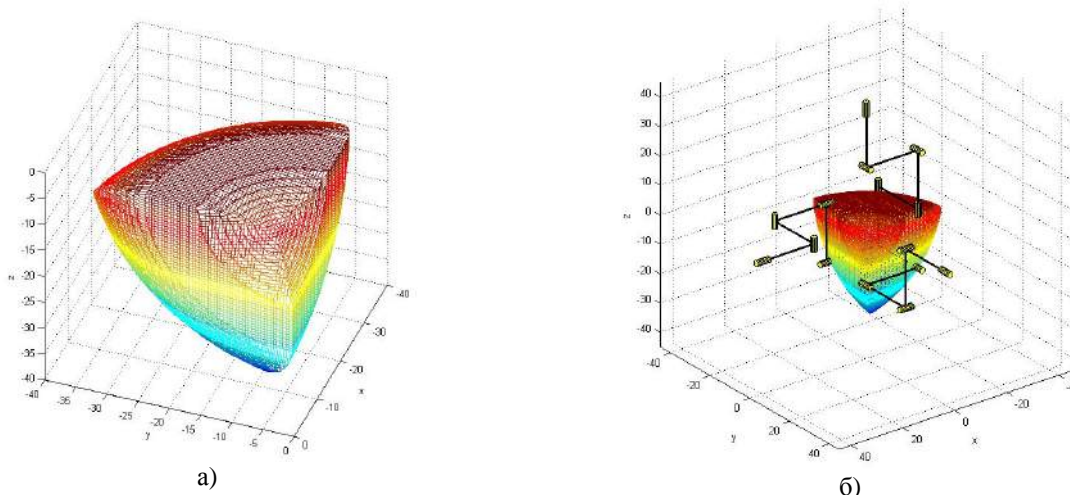


Рис. 3

На рис. 3-а показана рабочая зона механизма с одинаковой длиной всех звеньев $\ell=20$. Как видно из рисунка, она занимает не весь возможный объем, ограниченный интервалом $[-2\ell; 0]$ по каждой координате, а лишь 36,58% данного объема. Сравнительный размер всего механизма и рабочей зоны показан на рис. 3-б.

Следует отметить, что объем рабочей зоны зависит только от одного параметра ℓ . Поэтому форма данной зоны всегда будет одинакова, а при изменении значения данного параметра, одинакового для всех

подобных звеньев каждой кинематической цепи, будут меняться лишь ее размеры.

Теперь рассмотрим особые положения (сингулярности) механизма, которые принято разделять на три типа: сингулярность 1-го типа, при которой механизм теряет одну или несколько степеней свободы; сингулярность 2-го типа, при которой происходит потеря управления механизмом, то есть возможно некоторое перемещение его выходного звена при зафиксированных приводах; сингулярность 3-го типа, при которой могут проявляться явления, свой-

ственные для сингулярности как 1-го, так и 2-го типа.

Для определения той или иной сингулярности необходимо рассмотреть условия вырождения матриц [2]:

$$J_A = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1(x, y, z, \theta_1)}{\partial x} & \frac{\partial F_1(x, y, z, \theta_1)}{\partial y} & \frac{\partial F_1(x, y, z, \theta_1)}{\partial z} \\ \frac{\partial F_2(x, y, z, \theta_2)}{\partial x} & \frac{\partial F_2(x, y, z, \theta_2)}{\partial y} & \frac{\partial F_2(x, y, z, \theta_2)}{\partial z} \\ \frac{\partial F_3(x, y, z, \theta_3)}{\partial x} & \frac{\partial F_3(x, y, z, \theta_3)}{\partial y} & \frac{\partial F_3(x, y, z, \theta_3)}{\partial z} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$J_B = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1(x, y, z, \theta_1)}{\partial \theta_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial F_2(x, y, z, \theta_2)}{\partial \theta_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial F_3(x, y, z, \theta_3)}{\partial \theta_3} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $F_1(x; y; z; \theta_1)$, $F_2(x; y; z; \theta_2)$, $F_3(x; y; z; \theta_3)$ – соответственно первое, второе и третье уравнения системы (1), представленные как неявные функции переменных x , y , z , θ_1 , θ_2 , θ_3 , а элементы матриц (2) и (3) – частные производные этих неявных функций по каждой из переменных.

Условием сингулярности 1-го типа является вырожденность матрицы J_B , то есть случай, когда ее определитель равен нулю либо не определен. Для рассматриваемого механизма, как было выяснено в ходе компьютерного исследования элементов матрицы (3), это возможно при выполнении любого одного из следующих девяти условий:

$$x=0, \quad x=-2l_2, \quad y=0, \quad y=-2l_2, \quad z=0, \quad z=-2l_2, \quad (4)$$

$$y = -z \operatorname{tg} \theta_1, \quad z = -x \operatorname{tg} \theta_2, \quad x = -y \operatorname{tg} \theta_3. \quad (5)$$

Условием сингулярности 2-го типа является вырожденность матрицы J_A . Исследование элементов матрицы (2) показало, что для данного механизма в его рабочей зоне таких точек не существует.

Условием сингулярности 3-го типа является вырожденность обеих матриц J_A и J_B в случае, когда определитель матрицы J_A не определен, а определитель матрицы

J_B равен нулю, что это возможно в тех случаях, когда выполняется хотя бы одно из условий (4).

Таким образом, анализ особых положений показывает, что исследуемый механизм имеет сингулярности только 1 и 3-го типа. При этом необходимо отметить, что условия (4) и (5) выполняются только на теоретической границе рабочей зоны, практически недоступной при эксплуатации в реальных условиях.

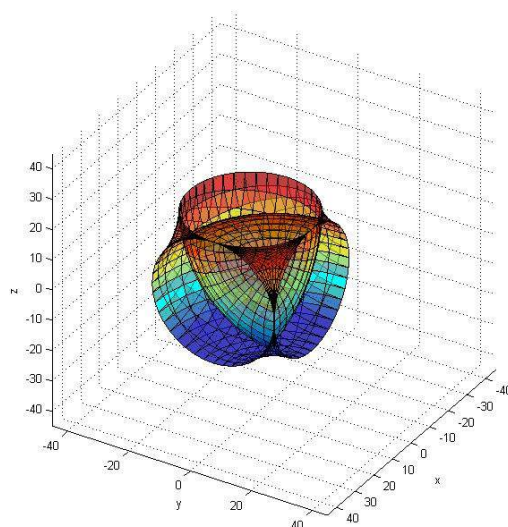


Рис. 4

Поверхности, соответствующие особым положениям механизма на интервале $[-21;0]$, представлены на рис. 4. Каждая из них идентична одной четвертой части топов, показанных на рис. 2-в, и лежит на границе рабочей зоны механизма. Следовательно, конструкция разработанного манипуляционного механизма обеспечивает его работу без возникновения особых положений.

ВЫВОДЫ

1. Решена задача по определению формы и размеров рабочей зоны новой конструкции манипулятора параллельной структуры с тремя степенями свободы, предназначенного для использования в системах автоматизации предприятий текстильной и легкой промышленности.

2. Исследование особых положений манипулятора, в которых возможна потеря им одной из степеней свободы или управ-

ляемости, показало, что его конструкция практически исключает возможность их появления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Климов В.А., Гончаренко В.Н., Ганулич А.А. и др.* Робототехнические системы в текстильной и легкой промышленности. – М.: Легпромбытиздат, 1991.
2. *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.
3. *Ширинкин М.А., Глазунов В.А., Палочкин С.В.* Разработка манипуляционного механизма параллельной структуры с четырьмя степенями свободы // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010, № 1. С. 102...107.

Рекомендована кафедрой прикладной механики. Поступила 14.02.12.