

**СИНТЕЗ И КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ
С РАЗВЯЗКОЙ ПОСТУПАТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ**

**SYNTHESIS AND THE KINEMATIC ANALYSIS
OF MECHANISMS OF PARALLEL STRUCTURE
WITH THE OUTCOME OF PROGRESS**

Н.Ю. НОСОВА, В.А. ГЛАЗУНОВ, С.Ю. МИСЮРИН, Д.Н. ФИЛИППОВ
N.YU. NOSOVA, V.A. GLAZUNOV, C.YU. MISYURIN, D.N. FILIPPOV

(Московский государственный университет дизайна и технологий,
Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ",
Московский государственный технологический университет им. Н.Э. Баумана)
(Moscow State University of Design and Technology,
National Research Nuclear University "MEPHI",
Bauman Moscow State Technical University)
E-mail: office@msta.ac.ru

В работе представлен механизм с шестью степенями свободы с развязкой поступательных и вращательных движений, что является значительным преимуществом перед аналогичными механизмами, не имеющими развязки. Для данного механизма аналитически решена прямая и обратная задача кинематики, что стало возможным благодаря выбранной конструкции механизма.

This paper presents a mechanism with six degrees of freedom decoupled translational and rotational movements, which is a significant advantage over similar mechanisms that do not have a solution. For this mechanism analytically solved direct and inverse kinematics problem, which was made possible thanks to the chosen design of the mechanism.

Ключевые слова: манипулятор параллельной структуры, прямая и обратная задачи кинематики, рабочее пространство, абсолютные и обобщенные координаты.

Keywords: manipulator of parallel structure, direct and inverse kinematics, workspace, absolute and generalized coordinates.

В текстильной и легкой промышленности с повышением уровня автоматизации повышаются и требования к механизмам, используемым как в основных технологических, так и вспомогательных транспортных операциях. Встречаются два основных типа механизмов – механизмы с открытой кинематикой и механизмы с параллельной структурой [1...4]. Оба типа механизмов имеют свои преимущества и недостатки. Механизмы с открытой кинематикой более просты в управлении, имеют развязку по приводам и достаточно просты в управле-

нии, однако они менее грузоподъемные. Механизмы параллельной структуры имеют преимущества по таким характеристикам, как жесткость конструкции, грузоподъемность, точность позиционирования.

Пространственные механизмы параллельной структуры используются для выполнения различных технологических и технических операций, в зависимости от поставленной задачи и установленной программы управления. Следует также отметить, что во многих случаях манипуляционному механизму не требуется шесть

степеней свободы. Часто требуется либо только поступательные, либо только вращательные движения.

Одной из самых известных схем манипулятора параллельной структуры, выходное звено которого совершает только поступательно-направляющее движение, является манипулятор "DELTA", предложенный Р. Клавелем (рис. 1) [5]. Несмотря

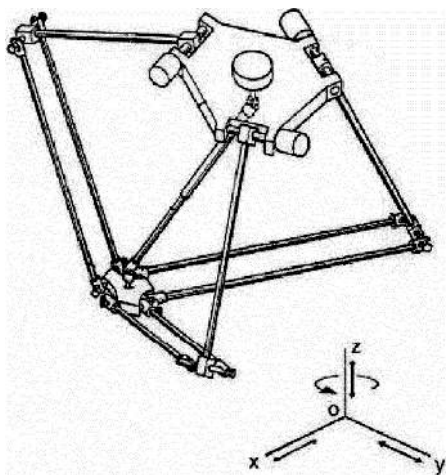


Рис. 1

Поступательно-направляющее движение имеет также манипуляционный механизм типа "ORTHOGLIDE" [6], [7]. Он содержит три кинематических цепи и три поступательных двигателя (рис. 2). В каждой цепи имеет место шарнирный параллелограмм, что обеспечивает постоянство ориентации выходного звена. Данная схема во многом сходна со схемой манипулятора "DELTA", однако вращательные двигатели заменены на поступательные.

Наряду с преимуществами механизмы параллельной структуры имеют и недостатки – ограниченное рабочее пространство, наличие особых положений в окрестности рабочего пространства, трудности поведения параметрического синтеза механизма. Развитие аналитических и численных методов анализа и синтеза пространственных механизмов параллельной структуры в последнее время позволило значительно расширить области их применения. Так, в работах [8...10] исследовалась возможность расширения рабочего пространства за счет согласованного синтеза параметров механизма и закона

на то, что все двигатели этого манипуляционного механизма вращательные, выходное звено не меняет свою ориентацию. За счет того, что промежуточные звенья механизмов имеют малую массу, механизм является малоинерционным и имеет весьма высокое быстродействие.

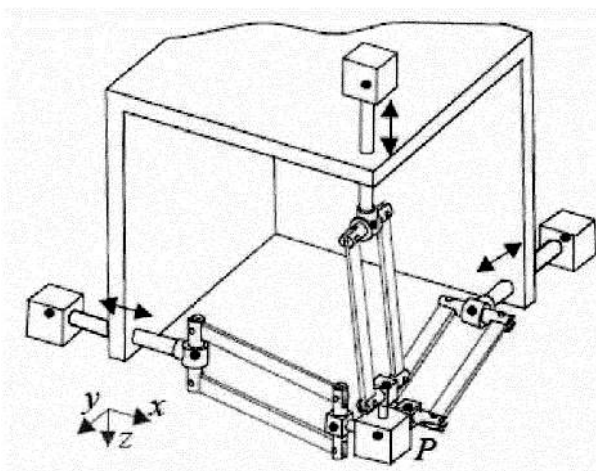


Рис. 2

управления. В работах [11], [12] проведены расчеты (решена прямая и обратная задача кинематики, определены особые положения, определено рабочее пространство) механизмов с тремя и четырьмя степенями свободы.

Одной из важнейших задач анализа, синтеза и управления для манипуляторов параллельной структуры является кинематическая задача о положениях, которая заключается в определении взаимосвязи между обобщенными и абсолютными координатами. Абсолютными координатами называются координаты в декартовой системе координат, определяющие положение выходного звена. Обобщенными (независимыми) координатами называются координаты, описывающие изменение положения входных звеньев.

Рассмотрим обратную задачу кинематики (о положениях) механизма параллельной структуры с поступательно-направляющими двигателями, расположенными по осям декартовой системы координат, в той их части, которая определяет поступательные движения (рис. 3 – манипулятор с шестью степенями свободы).

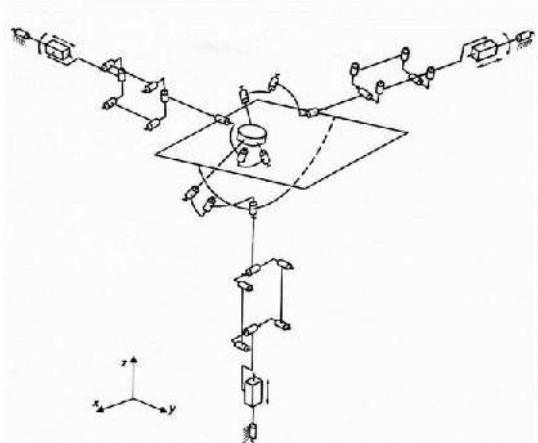


Рис. 3

Поступательные движения обусловлены тем, что в каждой цепи имеется шарнирный параллелограмм, две вращательные кинематические пары и линейный двигатель. Эту структуру заменим на механизм "пирамида" (рис. 4-а), который может быть использован для схем типа ORTHOGLIDE (рис. 4-б).

Замещающий механизм получается из исходного таким образом, что все кинематические цепи мысленно сдвигаются к центру выходного звена. Обобщенными координатами будут отрезки, характеризующие положения точек B_1, B_2, B_3 . Абсолютными координатами выходного звена (иными словами, выходными координатами) будут координаты точки A . Чтобы показать, что два механизма эквивалентны друг другу, проведем их структурный анализ. Для этого посчитаем число степеней свободы W данных манипуляционных механизмов по формуле А.П. Малышева для пространственных механизмов:

$$W = 6(n-1) - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3, \quad (1)$$

где n – число звеньев; p_5 – число пар пятого класса (одноподвижных пар); p_4 – число пар четвертого класса (двухподвижных пар); p_3 – число пар третьего класса (трехподвижных пар).

Используем формулу (1) для определения числа степеней свободы заменяющего механизма "пирамида" (рис. 4-а). В общей сложности получаем 7 звеньев, 3 однопо-

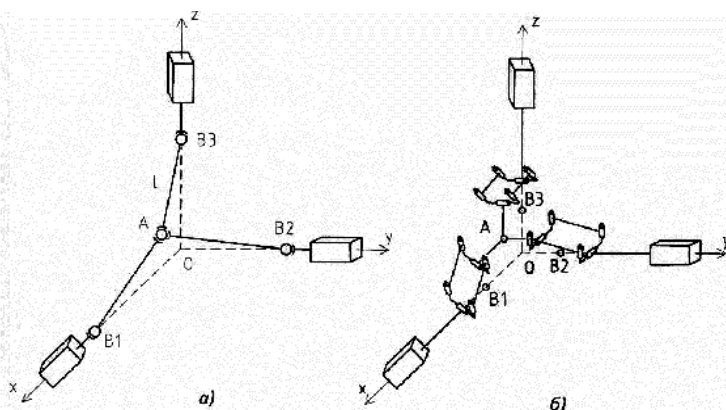


Рис. 4

движных кинематических пары и 6 трехподвижных кинематических пар в механизме. Подставив значения в (1), имеем:

$$W = 6(7 - 1) - 5 \cdot 3 - 3 \cdot 6 = 3.$$

Получили механизм с тремя степенями свободы.

Рассмотрим схему типа ORTHOGLIDE (рис. 4-б). Используем формулу (1) для определения числа степеней свободы данного механизма. В общей сложности получаем 17 звеньев и 21 одноподвижную кинематическую пару в механизме. Подставив значения в (1), получаем:

$$W = 6(17-1) - 5 \cdot 21 = -9.$$

Данный результат не является верным, так как не учитываются шарнирные параллелограммы. Число степеней свободы шарнирного параллелограмма равно единице по формуле П.Л. Чебышева для плоских механизмов, следовательно, мы можем его рассматривать как одноподвижную поступательную кинематическую пару. Двенадцать вращательных кинематических пар трех параллелограммов заменяем тремя поступательными кинематическими парами. Подсчитав число степеней свободы при этом условии, имеем:

$$W = 6(11-1) - 5 \cdot 12 = 0.$$

Данный результат также является неверным.

Заменим шарнирные параллелограммы карданным шарниром. Подставив значения в (1), получаем:

$$W = 6(14-1) - 5 \cdot 15 = 3.$$

Таким образом, число степеней свободы равно трем. Следовательно, замена кинематической схемы на аналог позволила определить подвижность механизма.

Обратная задача кинематики состоит в определении значения входных переменных (x_{B1} , y_{B2} , z_{B3}) по известным значениям выходных (x_A , y_A , z_A).

В системе координат хуз расположена точка А, положение которой не совпадает с началом координат точкой О. Необходимо определить координаты x_{B1} , y_{B2} , z_{B3} , то есть, на какое расстояние L_x^* , L_y^* , L_z^* переместятся входные звенья механизма.

Точка А имеет координаты (x_A ; y_A , z_A). Чтобы узнать, на какое расстояние переместились входные звенья механизма относительно начала координат, запишем следующие уравнения:

$$\begin{aligned} (x_A - x_{B1})^2 + (y_A - y_{B1})^2 + (z_A - z_{B1})^2 &= L^2, \\ (x_A - x_{B2})^2 + (y_A - y_{B2})^2 + (z_A - z_{B2})^2 &= L^2, \\ (x_A - x_{B3})^2 + (y_A - y_{B3})^2 + (z_A - z_{B3})^2 &= L^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где L – длина промежуточного звена каждой цепи.

Координаты y_{B1}^2 , z_{B1}^2 , x_{B2}^2 , z_{B2}^2 , x_{B3}^2 и y_{B3}^2 обратятся в ноль, поскольку соответствующие входные звенья расположены вдоль координатных осей.

Решив систему независимых квадратных уравнений (2), получаем:

$$x_{B1} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A},$$

где $B = -2x_A$, $C = x_A^2 + y_A^2 + z_A^2 - L^2$,

$$y_{B2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A},$$

где $B = -2y_A$, $C = x_A^2 + y_A^2 + z_A^2 - L^2$,

$$z_{B3} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A},$$

где $B = -2z_A$, $C = x_A^2 + y_A^2 + z_A^2 - L^2$.

Для прямой задачи кинематики значения положений входных звеньев механизма (x_{B1} , y_{B2} , z_{B3}) считаются известными, а неизвестными являются выходные параметры (x_A ; y_A , z_A). Эта задача допускает несколько решений, соответствующих различным сборкам механизма.

Из полученных трех уравнений системы (2) необходимо найти три неизвестных, а именно x_A ; y_A , z_A , причем эти уравнения зависимы между собой.

Решая систему уравнений (2), имеем:

$$x_A = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A},$$

где $A = b^2 + d^2$, $B = -2x_{B1} + 2ab + 2cd$, $C = x_{B1}^2 + a^2 + c^2 - L^2$,

$$y_A = a + bx_A,$$

где $a = \frac{y_{B2}^2 - y_{B1}^2}{2y_{B2}}$, $b = \frac{2x_{B1}}{2y_{B2}} = \frac{x_{B1}}{y_{B2}}$,

$$z_A = c + dx_A,$$

где $c = \frac{z_{B3}^2 - x_{B1}^2}{2z_{B3}}$, $d = \frac{2x_{B1}}{2z_{B3}} = \frac{x_{B1}}{z_{B3}}$.

Знак \pm у подкоренного выражения для переменной x_A говорит о том, что возможны различные сборки механизма.

ВЫВОДЫ

1. Тенденция конструирования пространственных механизмов с несколькими степенями свободы в последнее время развивается по пути создания механизмов параллельной структуры с замкнутыми кинематическими цепями.

2. Замена кинематической схемы на аналог позволила определить подвижность механизма по формуле Малышева-Чебышева.

3. Упрощенная кинематическая схема механизма позволила решить прямую задачу кинематики для пространственного механизма с тремя степенями свободы в явном виде.

4. На основании полученных решений прямой задачи кинематики получены все возможные конфигурации (сборки) механизма при заданных значениях входных параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Merlet J.P.* Parallel Robots. Solid mechanics and its applications.- Merlet-Kluwer. // Academic Publishers. – 2000. P. 394.

2. *Kong X., Gosselin C.* Type Synthesis of Parallel Mechanisms. // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2007. P. 272.

3. *Gogu G.* Structural Synthesis of Parallel Robots. Part 2: Translational Topologies with Two and Three Degrees of Freedom. // Springer Science + Business Media B.V. 2009.

4. *Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф.* Пространственные механизмы параллельной структуры. – М.: Наука. 1991. С. 94.

5. *Clavel R.* Delta, a fast robot with parallel geometry // In 18th Int. Symp. on Industrial Robot., Lausanne. – April, 26-28, 1988. P. 91...100.

6. *Chablat D., Wenger Ph.* United States Patent Application Publication. Pub. No.: US 2007/0062321 A1. Pub. Date: Mar. 22, 2007. Device for the movement and orientation of an object in space and use thereof in rapid machining. Sainte Luce Sur Loire (FR).

7. *Chablat D., Wenger Ph., Staicu, S.* Dynamics of the Orthoglide parallel robot. // UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. – V. 71, (3), 2009. P. 3...16.

8. *Kreinin G.V. and Misyurin S.Yu.* On Some General Laws in Drive Dynamics. ISSN 1052-6188 // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – Vol. 37, №6, 2008. P.546...551.

9. *Kreinin G.V. and Misyurin S.Yu.* A Systematic Approach to Synthesis of a Drive System. ISSN 1052-6188 // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. –Vol. 40, №6, 2011. P.507...511.

10. *Kreinin G.V. and Misyurin S.Yu.* Influence of the Gear Ratio on the Dynamics of a Control-System Drive. ISSN 1052-6188 // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. –Vol. 41, № 6, 2012. P. 486...491.

11. *Shirinkin, M.A., Glazunov, V.A., Palochkin, S.V.* Development of the manipulation mechanism of the parallel structure with four degrees of freedom, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2010, (1). P. 102...107.

12. *Shirinkin, M.A., Glazunov, V.A., Palochkin, S.V., Hejlo, S.V.* Solving the problem on speeds and special configurations of the manipulator of parallel structure, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2011, (3). P. 95...101.

Рекомендована кафедрой прикладной механики. Поступила 04.09.14.