

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ О ПОЛОЖЕНИЯХ МЕТОДОМ ВИНТОВОГО ИСЧИСЛЕНИЯ ДЛЯ l -КООРДИНАТНЫХ РОБОТОВ РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРЫ

В.А. Глазунов

Институт машиноведения им. А.А. Благодравова РАН
Россия, 101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4
E-mail: vaglznv@mail.ru

Г.В. Рашоян

Институт машиноведения им. А.А. Благодравова РАН
Россия, 101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4
E-mail: gagik_r@bk.ru

К.А. Шалюхин

Институт машиноведения им. А.А. Благодравова РАН
Россия, 101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4
E-mail: constmeister@gmail.com

А.К. Алешин

Институт машиноведения им. А.А. Благодравова РАН
Россия, 101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4
E-mail: aleshin_ak@mail.ru

С.А. Скворцов

Институт машиноведения им. А.А. Благодравова РАН
Россия, 101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4
E-mail: 1691skvorcov@mail.ru

Ключевые слова: l - координатный робот, преобразованный l - координатный механизм, задача о положениях, кинематический винт, плюккеры координаты.

Аннотация: В статье решена прямая задача о положениях для пространственного робота параллельной структуры с 6-ю поступательными двигательными кинематическими парами. Благодаря высоким показателям по точности и грузоподъемности, обусловленным конструктивными особенностями (подобны фермам), l - координатные механизмы находят широкое применение в роботах и манипуляторах. Приведен алгоритм численного решения прямой задачи о положениях для пространственного l - координатного робота параллельной структуры с обобщенными линейными координатами, основанный на применении теории винтов. Для преобразованных l -координатных структурных схем механизмов разработан алгоритм решения прямой задачи о положениях. Приведен пример, показывающий, что для базового и преобразованного механизмов решение задач о положениях аналогично.

Известно, что успешное решение прямой и обратной задач о положениях позволяет наиболее точно оценить функциональные возможности проектируемого механизма, а

именно определить границы рабочей зоны, наличие особых положений в них и обход этих положений и т.д. Аналитическое решение обратной задачи о положениях необходимо для кинематического управления движением механизма. Полученные результаты особенно важны для пространственных механизмов параллельной структуры, так как в них, по сравнению с пространственными механизмами с открытой кинематической цепью, имеются множество кинематических пар и звеньев, количество которых превышает число степеней свободы. В работах [1-14] рассмотрено применение численных методов и теории винтов в кинематике пространственных механизмов. В данной работе этот подход распространяется на преобразованные l - координатные роботы, в котором приводы расположены вне рабочей зоны [12].

Рассмотрим итерационный алгоритм решения прямой задачи о положениях, который может быть применен для всех l -координатных структур.

Как известно, l -координатный механизм состоит из шести соединительных цепей с одной поступательной приводной парой и с двумя сферическими, неприводными парами (рис.1). Предположим, что известно начальное положение выходного звена в неподвижной системе координат, при известных значениях обобщенных l -координат. Необходимо найти элементарное перемещение выходного звена по заданным элементарным приращениям обобщенных координат Δl_i ($i=1, \dots, 6$) и определить кинематический винт W элементарного перемещения выходного звена.

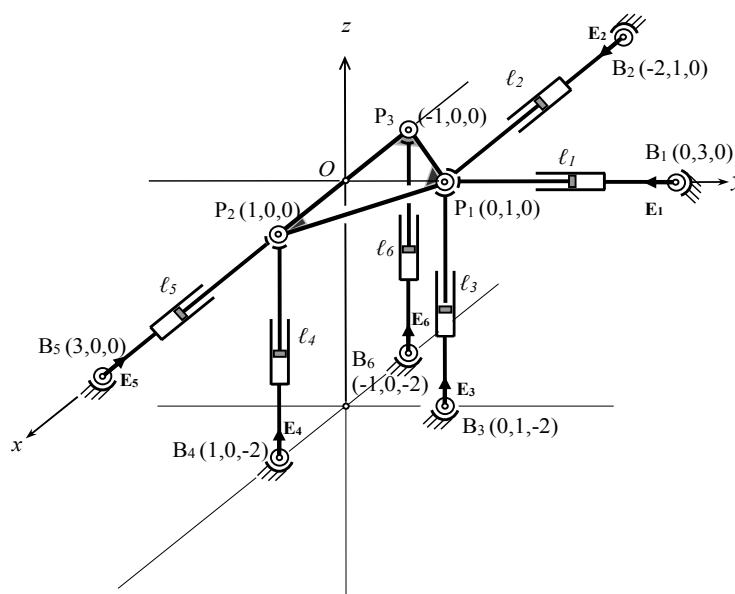


Рис. 1. Пространственный l - координатный робот

Единичные орты E_1, \dots, E_6 , направим по l -координатам, соединяющим точки B_1, \dots, B_6 основания (базы) с точками P_1, P_2, P_3 выходного звена (платформы). Известно, что проекция момента искомого кинематического винта W , приведенного к точке P_i выходного звена, на орт E_i равна отношению момента W и E_i ($i=1, \dots, 6$) [6]. Поэтому, для определения изменения положения точки P_i по кинематическому винту W , составим его момент, приведенный к точке P_i . Таким образом, приращение обобщенной координаты Δl_i равно отношению момента E_i и W .

Обозначим плюккеровы координаты искомого кинематического винта W — x, y, z, x^0, y^0, z^0 , а плюккеровы координаты ортов E_i через $e_{xi}, e_{yi}, e_{zi}, e_{xi}^0, e_{yi}^0, e_{zi}^0$ ($i=1, \dots, 6$). Получим систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} e_{x1}^0 x + e_{y1}^0 y + e_{z1}^0 z + e_{x1}^0 x^0 + e_{y1}^0 y^0 + e_{z1}^0 z^0 = \Delta l_1 \\ \dots \\ e_{x6}^0 x + e_{y6}^0 y + e_{z6}^0 z + e_{x6}^0 x^0 + e_{y6}^0 y^0 + e_{z6}^0 z^0 = \Delta l_6 \end{cases}$$

Решением уравнений (1), при заданной правой части Δl_i , являются параметры искомого кинематического винта W . С другой стороны, можно получить решение правой части уравнения (1), при известном W . Итерационный метод решения прямой задачи о положениях требует на каждом шаге решения системы уравнений (1) и нахождения малого конечного кинематического винта W^* .

Для нахождения приращений декартовых координат точек P_1, P_2, P_3 составим момент винта W^* относительно этих точек и в конце каждого шага определим новое положение выходного звена. Применяв предложенный алгоритм многократно, можно решить поставленную задачу с некоторой ошибкой, уменьшение которой связано с увеличением количества итераций.

Рассмотрим пример – итерационное решение прямой задачи о положениях для механизма, положение, которого определяется шестью расстояниями между точками P_1, P_2, P_3 и B_1, \dots, B_6 (рис. 1). Отметим, что для механизма с заданной структурной схемой прямая задача о положениях имеет аналитическое решение и связана с рассмотрением трех систем квадратных уравнений.

Предположим, что в начальном положении механизма обобщенные координаты равны $l_i=2$ м, тогда матрица плюккерых координат единичных векторов E_i ($i=1, \dots, 6$) имеет следующий вид:

$$(2) \quad \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Зададим приращение обобщенным координатам l_1, l_2, l_3 и l_6 на 0,1 м. Выполним одну итерацию, решая систему уравнений (1), в которой правая часть имеет следующий вид $(0,1; 0,1; 0,1; 0; 0; 0,1)^T$ и находим плюккерывы координаты кинематического винта W :

$$x = 0,05 \text{рад}; y = 0,05 \text{рад}; z = -0,1 \text{рад}; x^0 = 0; y^0 = -0,1 \text{м}; z^0 = 0,05 \text{м}.$$

В таком случае точка выходного звена O переместится на 0 и -0,1 м по осям x и y соответственно, и на 0,05 м по оси z , а выходное звено ($\Delta P_1 P_2 P_3$) повернется вокруг оси с направляющим вектором $(0,05; 0,05; -0,1)$ на угол 0,122 рад.

Перенесем винт W к точкам P_1, P_2, P_3 и находим перемещение этих точек по осям x, y и z . Изменение координат состоит из суммы перемещений от моментной части винта и момента от векторной части винта относительно точек $P_1(0; 1; 0), P_2(1; 0; 0), P_3(-1; 0; 0)$. В результате приращений обобщенных координат, точка P_1 будет иметь координаты $(0,1; 0,9; -0,1)$, а невязка для обобщенных координат l_1, l_2, l_3 составит 0,00475 м, что составляет 4,75% от величины заданного шага. Точка P_2 будет иметь координаты $(1; -0,2; 0)$, а невязка для обобщенных координат l_4 и l_5 составит 0,01 м. Точка P_3 будет иметь координаты $(-1; 0; 0,1)$ с нулевой невязкой для обобщенной координаты l_6 .

Таким образом, получен алгоритм решения прямой задачи о положениях для базовой структурной схемы (рис.1). В работе [12] приведены преобразованные l -координатные механизмы с двигательными системами робота, выведенными за пределы рабочей зоны. На рисунке 2 приведена структура робота, эквивалентная базовой (рис. 1). Для решения прямой задачи о положениях в преобразованной структуре необходимо привести единичные векторы к точкам P_1, P_2, P_3 . При этом, векторы E_3, E_4 и E_6 по направлению совпадут с аналогичными векторами для базовой структуры (рис.1), а

E_1', E_2' , приведенные к точке P_1 и E_3' - к точке P_2 , изменят направление на противоположное.

Для преобразованной структуры робота составим матрицу плюккеровых координат единичных ортов E_i , приведенных к точкам P_1, P_2, P_3 :

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Анализ данной матрицы показывает, что ее элементы совпадают с элементами (2) с точностью до знака. Следует отметить, что механизм на рис. 2 по алгоритму решения прямой задачи о положениях аналогичен базовому.

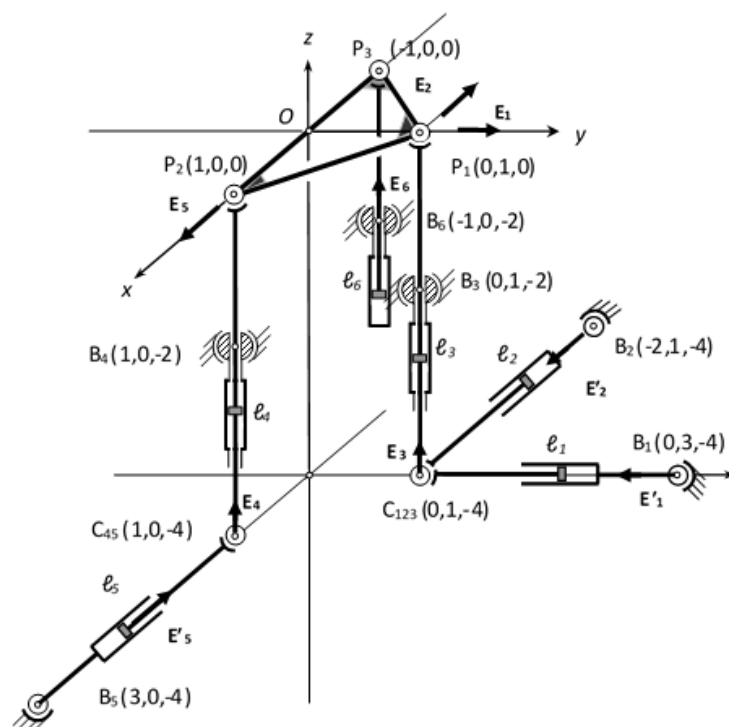


Рис. 2. Преобразованный эквивалентный робот.

Вектор элементарных приращений обобщенных координат Δl_i ($i=1, \dots, 6$) из правой части (1) примет следующий вид: $\left(\frac{B_3 P_1}{B_3 C_{123}} \cdot \Delta l_1; \frac{B_3 P_1}{B_3 C_{123}} \cdot \Delta l_2; \Delta l_3; \Delta l_4; \frac{B_4 P_2}{B_4 C_{45}} \cdot \Delta l_5; \Delta l_6 \right)^T$. Множители компонент вектора определяются соотношением плеч рычага, образованного «звеньями-вводами» в преобразованном роботе (рис. 3). Решение задачи о положениях аналогично приведенному выше для робота базовой структуры. Покажем это на примере (рис. 2).

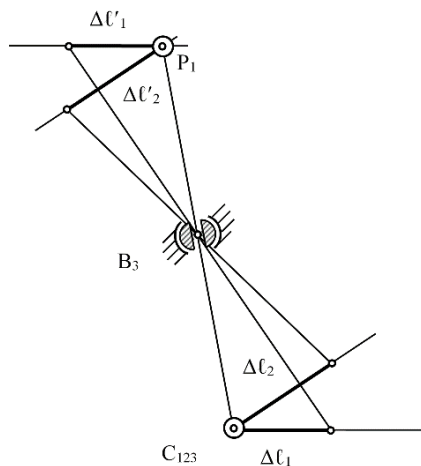


Рис. 3. Схема передачи движения.

Для робота с преобразованной структурой зададим приращение l_1, l_2, l_3 и l_6 величиной 0,1 м. Решим систему (1), правая часть которой имеет вид, аналогичный показанному в предыдущем примере, так как соотношение плеч рычага $\frac{B_3 P_1}{B_3 C_{123}} = 1$. Определим плюккеровы координаты кинематического винта W_k :

$$x = 0,05 \text{ рад}; y = 0,05 \text{ рад}; z = 0,1 \text{ рад}; x^0 = 0; y^0 = 0,1 \text{ м}; z^0 = 0,05 \text{ м}.$$

Точка O выходного звена переместится по осям: x на 0 м, y на 0,1 м, z на 0,05 м, а выходное звено повернется вокруг оси с направляющим вектором $(0,05; 0,05; 0,1)$ на угол 0,122 рад. Составим момент винта W_k относительно точек P_1, P_2, P_3 и найдем их перемещение. Новые координаты точек выходного звена робота: $P_1(-0,1; 1,1; 0,1)$, $P_2(1; 0,2; 0)$, $P_3(-1; 0; 0,1)$.

Таким образом в работе представлен алгоритм решения прямой задачи о положениях для пространственных l -координатных механизмов как базовой, так и преобразованной структуры, а матрица плюккеровых координат преобразованной структуры робота повторяет матрицу (1) с точностью до знака множителя.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (16-29-04273 офи_м)

Список литературы

1. Алешин А.К., Глазунов В.А., Рашоян Г.В., Оффер Шаи. Анализ кинематических винтов, определяющих топологию сингулярных зон роботов параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 4. С. 3-8.
2. Алешин А.К., Глазунов В.А., Рашоян Г.В., Оффер Шаи, Г.В. Рашоян, С.А. Скворцов. Анализ элементарных перемещений манипулятора параллельной структуры с круговой направляющей на основе дифференцирования уравнения связей // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 5. С.17-21.
3. Hunt K. Structural kinematics of in-parallel-actuated robot arms / ASME. Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design. 1983. Vol. 105. P. 705-712.
4. Merlet J.-P. Singular configurations of parallel manipulators and Grassman geometry // Intern. J. RoboticRes. 1989. Vol. 8, No. 5. P. 45-56.
5. Rashoyan, G.V., Shalyukhin, K.A., Gaponenko, E.V. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327, No. 4. Номер статьи 042090 11th International Conference on Mechanical Engi-

- neering, Automation and Control Systems, MEACS 2017. Статья в сборнике трудов конференции. Tomsk, Russian Federation, 4 December 2017 - 6 December 2017
6. Глазунов В.А., Колисков А.Ш., Крайнев А.Ф., Модель Б.И. Принципы классификации и методы анализа пространственных механизмов с параллельной структурой / Проблемы машиностроения и надежности машин. 1990. № 1. С. 41-49.
 7. Glazunov V.A., Kraynev A.F., Rashoyan G.V., Trifonova A.N. Singular zone of parallel structure mechanisms // Tenth World Congress on TMM. Proceedings. Oulu, Finland, 1999. P. 2710-2715.
 8. Глазунов В.А., Диментберг Ф.М. Об особом положении пространственного пятизвенника, образованного из двух механизмов Беннета // Машиноведение. 1984. № 5. С. 50-54.
 9. Глазунов В.А., Крайнев А.Ф., Рашоян Г.В., Быков Р.Э., Цыбин А.В. К задаче о выводе из особых положений механизмов параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2001. № 6. С. 70-75.
 10. Glazunov V. Twists of Movements of Parallel Mechanisms Inside Their Singularities // Mechanism and Machine Theory. 2006. Vol. 41. P. 1185-1195.
 11. Глазунов В.А. Об управлении манипулятором в особенных положениях // Изв. АН СССР, Механика твердого тела. 1985. № 4. С. 60-65.
 12. Новые механизмы в современной робототехнике / Под редакцией В.А. Глазунова М.: Техносфера, ISBN 978-5-94836-537-4, 2018. 314 с.
 13. Антонов А.В., Глазунов В.А., Алешин А.К., Рашоян Г.В., Лактионова М.М./ Кинематический анализ механизма параллельной структуры для работы в агрессивных средах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 2. С. 3-10.
 14. Рашоян Г. В., Алешин А.К, Скворцов С.А., Левин С. В., Антонов А.В., Шалюхин К.А. Задачи кинематического анализа и особых положений механизмов роботов параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018, № 4. С. 11-18.