электронный научно-технический журнал
ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51036. ISSN 2307-0595

Об исследовании особых положений, связанных с вырождением связей, в механизмах параллельной структуры

10, октябрь 2014

Ларюшкин П. А.

УДК: 621.865.8

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
pav.and.lar@gmail.com

Введение

Манипуляторы параллельной структуры представляют собой класс механизмов с замкнутыми кинематическими цепями, активно развивающийся с 80-х годов прошлого века. Механизмы данного типа успешно используются в различных типах оборудования: металлообрабатывающих станках, упаковочно-сортировочных комплексах, авиатренажерах, медицинском оборудовании и т.д. Параллельные механизмы обладают большей точностью позиционирования, скоростью и грузоподъемностью по сравнению с механизмами более привычной открытой структуры, однако обладают и рядом существенных недостатков. К таким недостаткам относятся: относительно малые размеры рабочего пространства, повышенные требования к точности изготовления и сборки деталей и узлов, а также наличие особых положений.

Особые (или сингулярные) положения механизмов параллельный структуры – это такие точки в пределах рабочего пространства манипулятора, попав в которые, его выходное звено (рабочий орган) теряет как минимум одну степень свободы или приобретает возможность неуправляемого движения. Вопросы увеличения зон внутри рабочего пространства, свободных от таких положений, а также планирование обходных траекторий движения выходного звена является важным шагом при синтезе и анализе механизмов данного класса.

При анализе особых положений, как правило, применяют метод, основанный на анализе матрицы Якоби, получаемой дифференцированием уравнений связи и описывающей переход от обобщенных скоростей в приводных кинематических парах к угловым или линейным скоростям выходного звена [1]. Данный метод относительно прост в использовании и дает хорошие результаты, однако, без существенных модификаций, подразумевающих рассмотрение скоростей во всех кинематических парах механизма, включая пассивные, он не позволяет рассматривать особые положения, связанные с вырождением связей [2].

1. Анализ особых положений манипуляторов параллельной структуры, связанных с вырождением связей, с использованием винтового исчисления

Согласно [3], особые положения данного типа могут возникать в механизмах параллельной структуры, у которых имеются кинематические цепи с большим количеством степеней свободы, чем у выходного звена. Иными словами кинематические цепи накладывают связи на выходное звено, лишая его определенных степеней свободы. В том случае, когда разные цепи налагают одинаковые связи, и возможно возникновение рассматриваемых особых положений.

Как уже было сказано использование свойств матрицы Якоби для анализа данных особых положений влечет за собой усложнение самого метода анализа, поэтому целесообразно использование методов винтового исчисления. На практике для этого можно использовать следующий предлагаемый порядок расчета:

1. Каждой кинематической паре механизма ставится в соответствие единичный кинематический винт, отражающий степень свободы, реализуемую данной парой.
2. Выбирается точка приведения (например, начало координат), и каждый из кинематических винтов записывается в виде вектора-строки, состоящего из плюккеровых координат винта относительно точки приведения.
3. Для каждой кинематической цепи находится группа силовых винтов, взаимных кинематическим винтам этой цепи.
4. Найденные силовые винты записываются в виде строк в матрицу, после чего отыскивается ранг этой матрицы. В случае если ранг матрицы меньше чем $6-n$ (где n – число степеней свободы механизма), то механизм находится в особом положении, и происходит вырождение связей, накладываемых на выходное звено.

Рассмотрим применение данного алгоритма на примере.

2. Пример анализа особых положений, связанных с вырождением связей

В качестве примера используем механизм с тремя степенями свободы. Особые положения данного механизма уже были проанализированы с помощью матрицы Якоби [4]. При этом было показано, что если рассматривать точки, отделяемые зонами особых положений, как недостижимые выходным звеном, то теоретический рабочий объем механизма сокращается всего на 0,27%. Рассмотрим теперь условия вырождения связей в данном механизме.

Рассматриваемый механизм имеет три кинематических цепи, каждая из которых включает по пять вращательных пар. Схема механизма представлена на рис. 1.

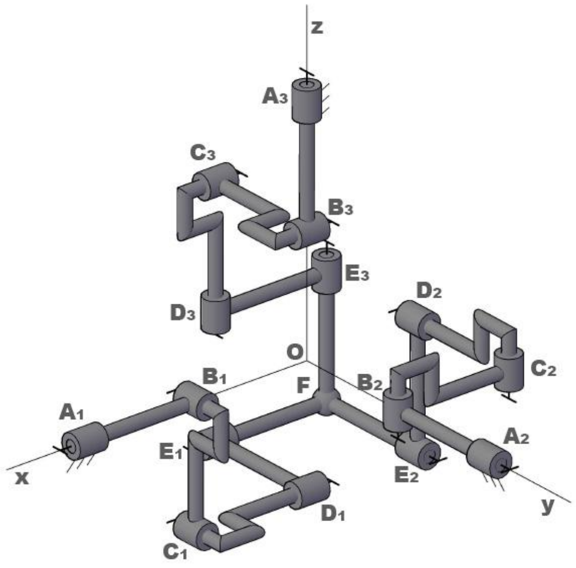

Рис. 1. Схема механизма с тремя степенями свободы

Каждой паре соответствует винт $\mathrm{T}_{i,j}$ (рис. 2), где i – номер цепи, а j – номер пары в цепи.

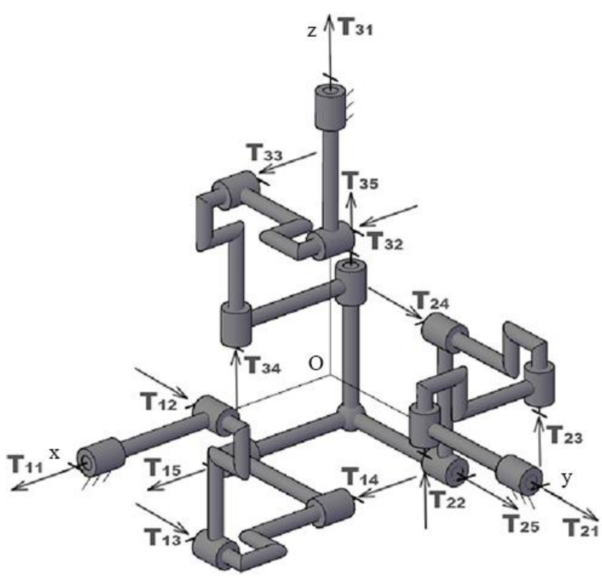

Рис. 2. Единичные винты кинематических пар

Выбрав в качестве точки приведения начало координат O, запишем плюккеровы координаты винтов. Так, для первой цепи

$$\begin{pmatrix} T_{1,1} \\ T_{1,2} \\ T_{1,3} \\ T_{1,4} \\ T_{1,5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 (l_A - l_1) & \cos\theta_1 (l_A - l_1) \\ 0 & \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & l_x & -\sin\theta_1 (x + l_5 + l_3) & \cos\theta_1 (x + l_5 + l_3) \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -l_x \cos\theta_1 & -l_x \sin\theta_1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & z & -y \end{pmatrix}$$

Здесь θ_1 – угол поворота входной пары первой цепи (A_1 на рис. 1); x, y, z – координаты выходного звена в декартовой системе координат. Остальные параметры являются геометрическими и считаются известными: l_1=A_iB_i, l_2=B_iC_i, l_3=C_iD_i, l_5=E_iF, l_A=A_iO. Величина l_x вычисляется следующим образом

$$l_x = l_2 \sqrt{1 - \left(\frac{x + l_2}{l_2} \right)^2}$$

Данной группе из пяти кинематических винтов будет взаимен один силовой винт $W_1 = (W_{(x)1}, W_{(y)1}, W_{(z)1}, W_{(\mathrm{mom}\,x)1}, W_{(\mathrm{mom}\,y)1}, W_{(\mathrm{mom}\,z)1})$, плюккеровы координаты которого можно определить с точностью до ненулевого множителя из следующего уравнения

$$\begin{pmatrix} T_{1,1} \\ T_{1,2} \\ T_{1,3} \\ T_{1,4} \\ T_{1,5} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} W_{(\mathrm{mom}\,x)1} \\ W_{(\mathrm{mom}\,y)1} \\ W_{(\mathrm{mom}\,z)1} \\ W_{(x)1} \\ W_{(y)1} \\ W_{(z)1} \end{pmatrix} = 0$$

В результате силовой винт, взаимный кинематическим винтам первой цепи имеет вид

$$W_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \sin\theta_1 & -\cos\theta_1 \end{pmatrix}$$

Находя аналогичным образом силовые винты для второй и третьей цепи, получим матрицу

$$\begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \sin\theta_1 & -\cos\theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & -\cos\theta_2 & 0 & \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & \sin\theta_3 & -\cos\theta_3 & 0 \end{pmatrix}$$

Данная матрица отражает связи, накладываемые цепями на выходное звено механизма. При этом видно, что поступательные степени свободы всегда «разрешены», а вращательные «запрещены». Таким образом, в случае вырождения данной матрицы выходное звено манипулятора приобретет дополнительную вращательную степень свободы.

При дальнейшем анализе рабочей зоны было установлено, что если точки, отделяемые зонами данных особых положений считать недостижимыми, то теоретический рабочий объем сократится на 4,48%. Учитывая также другие типы особых положений, общая потеря рабочего объема составит 4,69% (с учетом пересечения зон, отделяемых особыми положениями разных типов).

Не смотря на то, что общие потери теоретического рабочего объема механизма составили менее 5%, необходимо отметить, что анализ особых положений механизма без учета вырождения связей дает оценку потери рабочего объема, заниженную в более чем 17 раз.

Таким образом, учет возможного вырождения связей для тех механизмов, в которых оно возможно, является неотъемлемой частью общего анализа особых положений механизма.

Заключение

Данная статья посвящена такому явлению как вырождение связей в механизмах параллельной структуры. Приведено описание данного явления и теоретические основы его возникновения. Предложен алгоритм для практического исследования особых положений, связанных с вырождением связей. Приведен пример исследования для механизма с тремя степенями свободы, наглядно демонстрирующий необходимость анализа таких особых положений.

Список литературы

1. Gosselin C., Angeles J. Singularity Analysis of Closed Loop Kinematic Chains // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1990. Vol. 6(3). Pp. 281-290.
2. Di Gregorio R., Parenti-Castelli V. A Translational 3-DOF Parallel Manipulator // Advances in Robot Kinematics: Analysis and Control. 1998. Pp. 49-58.
3. Zlatanov D., Bonev I., Gosselin C. Constraint Singularities of Parallel Mechanisms // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2002. Pp. 496-502.
4. Ларюшкин П.А., Палочкин С.В. Рабочая зона манипулятора параллельной структуры с тремя степенями свободы // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2012. №3. С. 92-96.