

**Ключевые слова:**

механизм
параллельной
структуры, осо-
бые положения,
сингулярности,
взаимный кинематический винт,
линейные двига-
тели

К АНАЛИЗУ СИНГУЛЯРНЫХ ЗОН МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ЛИНЕЙНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

**Елена ГЕБЕЛЬ, Любовь ГАВРИЛИНА, Виктор ГЛАЗУНОВ,
Алексей ЛАСТОЧКИН, Андрей РОМАНОВ, Андрей ДУХОВ**

Рассмотрены различные особые положения (сингулярности) механизмов параллельной структуры с линейными двигателями, а также особое (сингулярное) положение, при котором был смещен центр выходного звена по сравнению с исходной конфигурацией. Проведено сравнение кинематических и взаимных винтов, соответствующих различным особым положениям (сингулярностям).

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач развития технических систем, применяемых в различных областях промышленности, добывающих отраслях, медицине и робототехнике [1–4], эффективным средством являются механизмы параллельной структуры [5–8], при исследовании которых целесообразно использовать винтовое исчисление [9].

Следует отметить, что данное направление исследований активно развивается. В частности, речь идет о механизмах с тросовыми приводами [10, 11], о применении этих устройств в медицинских системах и антропоморфных роботах [12, 13]. Углубленно исследуются различные свойства этих объектов и, в частности, возможности их балансировки и снижения энергозатрат [14, 15], способы устранения возможных особых положений (сингулярностей) [16, 17].

При анализе указанных технических систем важно учитывать конкретные условия, для которых предназначен данный объект [18–22]. Кроме того, необходимо принимать во внимание свойства технических объектов, в частности возможность наличия особых положений [7, 8, 23, 24]. В этих положениях резко снижается нагрузочная способность, может присутствовать неуправляемая подвижность. Наличие таких положений ухудшает функциональные возможности рассматриваемых устройств.

В качестве примера приведем перспективный технологический робот METROM, имеющий пять

степеней свободы и пять кинематических цепей, каждая из которых включает линейный двигатель [25, 26]. Этот робот (рис. 1) имеет достаточно большую зону обслуживания в силу того, что его особые положения располагаются вне рабочего объема. Вместе с тем, для большинства роботов параллельной структуры приходится ограничивать рабочую зону конфигурациями, далекими от особых, это сокращает рабочий объем.

Существует подход, позволяющий избежать этого недостатка – он заключается в переключении приводной кинематической пары при подходе к особым положениям, в частности, такие работы выполнены для трипода – механизма с тремя степенями



Рис. 1. Технологический робот METROM

свободы [27]. Однако, важно знать такие возможные движения робота, которые наиболее быстро выводят его из особого положения, а также такие движения, которые переводят в соседние особые положения. Дело в том, что дополнительный привод должен включаться кратковременно.

В связи с изложенным, в данной статье ставится задача определить кинематические винты – движения робота, которые соответствуют неуправляемой подвижности в особых положениях, а также наиболее быстрому выходу из особых положений. Эта задача рассматривается на относительно простом примере: когда все оси линейных двигателей пересекают одну прямую линию. В дальнейшем этот анализ будет распространен на более сложные случаи.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИНТА-ГРАДИЕНТА, ВЫВОДЯЩЕГО МЕХАНИЗМ ИЗ ОСОБОГО ПОЛОЖЕНИЯ

Перед рассмотрением вопросов вывода механизма из особых положений укажем на некоторые известные определения [9]. Кинематический винт – это дуальный вектор, включающий в себя вектор угловой скорости и вектор линейной скорости твердого тела. Силовой винт – это дуальный вектор, включающий вектор силы и вектор момента, действующие на твердое тело. Механизм параллельной структуры – это механизм, включающий в себя основание и выходное звено, соединенное несколькими кинематическими цепями. Особое положение (сингулярность) механизма параллельной структуры – это такое положение, при котором либо уменьшается число степеней свободы, либо имеет место неуправляемая подвижность, не связанная с движениями в приводах. Плюккерovy координаты силового и кинематического винтов – это шесть координат, три из которых представляют вектор силы или угловой скорости, а три других представляют координаты вектора момента или линейной скорости.

Рассмотрим механизм параллельной структуры с линейными двигателями, который находится в состоянии сингулярности, поскольку все силовые винты, передаваемые со стороны кинематических цепей на выходное звено, пересекают одну прямую линию vv (рис. 2).

Отметим, что силовые винты нулевого параметра – это скользящие векторы. Скользящий вектор, пересекающий оси всех силовых винтов, взаимен всем указанным винтам. Точки A_1-A_6 и B_1-B_6 являются центрами сферических шарниров, расположенных соответственно на выходном звене (подвижной платформе) и основании (базе). Векторы E_1-E_6 – единичные винты, направленные вдоль осей линейных двигателей, представляющих собой силовые винты. Линия vv пересекает оси всех сило-

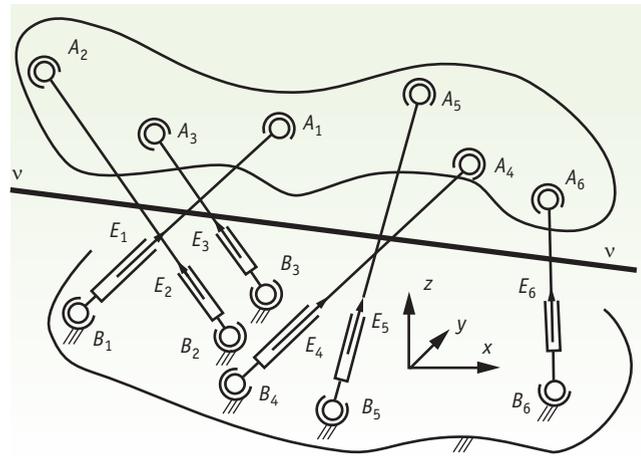


Рис. 2. Особое положение механизма параллельной структуры с линейными двигателями

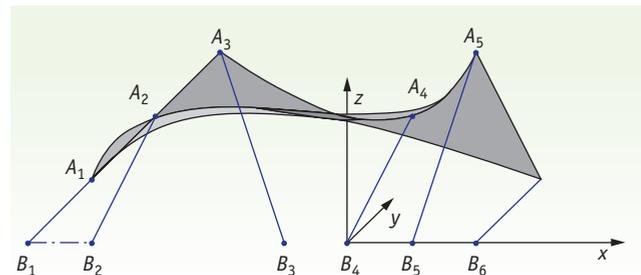


Рис. 3. Положение входного звена, при котором центры сферических шарниров B_i расположены на оси Ox

вых винтов (отсюда следует, что все винты E_1-E_6 – линейно зависимые).

Нужно найти винт-градиент с плюккеровыми координатами $(\xi, \eta, \zeta, \xi^0, \eta^0, \zeta^0)$, наиболее быстро выводящий из состояния сингулярности, а также соотносить его с кинематическим винтом, взаимным пяти независимым силовым винтам. Кроме того, покажем, что при расположении всех точек пересечения силовых винтов с линией vv на основании любое движение не будет выводить механизм из сингулярности.

Не нарушая общности, предположим, что линия vv совпадает с осью Ox (рис. 3).

Точки A_1-A_6 и B_1-B_6 имеют следующие координаты:

$$A = \begin{pmatrix} -4 & -3 & -2 & 1 & 2 & 3 \\ -2 & -1 & -2 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} -5 & -4 & -1 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Используем разработанный ранее подход [8, 23, 24] к поиску кинематического винта-градиента,

который ведет из особого положения по «наикратчайшему пути». Основу данного подхода представляет определение кинематического винта рабочего органа, а также связанных с ним плюккерových координат векторов единичной длины силовых винтов, лежащих на осях двигателей линейного перемещения.

Рассмотрение проведем для конкретного механизма. В результате решения задачи о положениях для заданных координат центров сферических шарниров на выходном звене и основании механизма с линейными двигателями (см. рис. 3) получены обобщенные координаты (м):

$$Q = (2,449 \ 2,449 \ 3,742 \ 3,000 \ 4,359 \ 4,243).$$

Матрица плюккерových координат ортов силовых винтов формируется согласно соотношению:

$$PL_i^T = \begin{pmatrix} \frac{X_{A_i} - X_{B_i}}{L_i} \\ \frac{Y_{A_i} - Y_{B_i}}{L_i} \\ \frac{Z_{A_i} - Z_{B_i}}{L_i} \\ \frac{Z_{A_i} - Z_{B_i}}{L_i} Y_B + \frac{Y_{A_i} - Y_{B_i}}{L_i} Z_{B_i} \\ \frac{X_{A_i} - X_{B_i}}{L_i} Z_B - \frac{Z_{A_i} - Z_{B_i}}{L_i} X_{B_i} \\ \frac{Y_{A_i} - Y_{B_i}}{L_i} X_{B_i} - \frac{X_{A_i} - X_{B_i}}{L_i} Y_{B_i} \end{pmatrix};$$

где первые три строки – направляющие косинусы единичного винта, а три оставшиеся – моментная часть винта, $X_{B_i}, Y_{B_i}, Z_{B_i}$ – координаты точки B_i ; $X_{A_i}, Y_{A_i}, Z_{A_i}$ – координаты точки A_i ; L_i – длина отрезка $A_i B_i$, где $i = 1, \dots, 6$.

Матрица плюккерových координат для заданного положения механизма:

$$PL = \begin{pmatrix} 0,408 & -0,816 & 0,408 & 0 & 2,041 & 4,082 \\ 0,408 & -0,408 & 0,816 & 0 & 3,266 & 1,633 \\ -0,267 & -0,535 & 0,802 & 0 & 0,802 & 0,535 \\ 0,333 & 0,667 & 0,667 & 0 & 0,000 & 0,000 \\ 0,229 & 0,688 & 0,668 & 0 & -0,668 & 0,000 \\ 0,236 & 0,943 & 0,236 & 0 & -0,471 & 1,886 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Ранг матрицы (1) равен пяти, а определитель – нулю. Запишем частные производные по плюккерovým координатам кинематического винта.

Для каждой строки матрицы, описывающей частные производные от плюккерových координат ортов силовых винтов по соответствующей плюккеровой координате кинематического винта выходного зве-

на, имеют место соотношения, зависящие от положения механизма [8, 23, 24].

Для нахождения координат винта-градиента далее в матрице плюккерových координат последовательно нужно заменить столбцы на соответствующие столбцы из матрицы частных производных. В итоге, последовательно суммируя определители полученных матриц, можно с точностью до множителя найти координаты винта-градиента.

Далее для иллюстрации результатов представим полученный винт-градиент в виде двух векторов. Обозначим векторную часть винта через $V (\xi, \eta, \zeta)$, а моментную – через $M (\xi^0, \eta^0, \zeta^0)$. Модуль вектора V определяется как корень квадратный из суммы квадратов его координат. Принимаем модуль вектора, равный двум, изменяя при этом ξ, η, ζ . Параметр винта ρ определяется как скалярное произведение вектора на момент, деленное на квадрат модуля вектора.

Радиус-вектор точки B , принадлежащей оси винта, равен:

$$\rho_B = \frac{(V \times M)}{|V|^2}.$$

Радиус-вектор точки A , соответствующей концу векторной части:

$$\rho_A = \rho_B + V.$$

Радиус-вектор точки C , соответствующей концу моментной части:

$$\rho_C = \rho_B + \rho V.$$

Матрицы частных производных по координате ξ имеют вид:

$$\begin{pmatrix} \frac{dx_1}{d\xi} & \frac{dy_1}{d\xi} & \dots & \frac{dz_1^0}{d\xi} \\ \frac{dx_2}{d\xi} & \frac{dy_2}{d\xi} & \dots & \frac{dz_2^0}{d\xi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{dx_6}{d\xi} & \frac{dy_6}{d\xi} & \dots & \frac{dz_6^0}{d\xi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Аналогично вычислены значения частных производных для остальных плюккерových координат. В соответствии с найденными параметрами получены значения плюккерových координат винта-градиента:

$$(\xi, \eta, \zeta, \xi^0, \eta^0, \zeta^0) = (0, 0, 0, 0, 0, 0).$$

Полученный результат объясняется тем, что при любых движениях выходного звена сохраняются

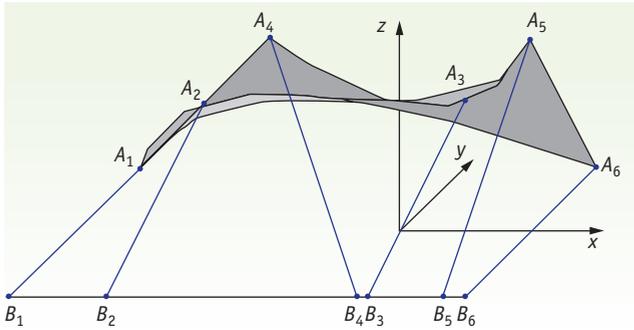


Рис. 4. Положение механизма с линейными двигателями, при котором центры сферических шарниров B_i расположены в плоскости $z = -1$

условия сингулярности, поскольку все оси силовых винтов всегда пересекают ось Ox .

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИНТА-ГРАДИЕНТА ДЛЯ СМЕЩЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА

Для другого механизма параллельной структуры с линейными двигателями (рис. 4) точки $B_1 - B_6$ смещены вдоль оси Oz на расстояние: -1 м.

Соответствующие значения координат точек A_i и B_i выходного звена и основания исследуемого механизма запишутся следующим образом:

$$A = \begin{pmatrix} -4 & -3 & -2 & 1 & 2 & 3 \\ -2 & -1 & -2 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix};$$

$$B = \begin{pmatrix} -6 & -4,5 & -0,667 & -0,5 & 0,667 & 1 \\ 2 & 0,5 & 0,667 & -1 & -1 & -4 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

При этом матрица плюккеровых координат остается неизменной. Интерес представляет взаимное соответствие кинематического винта, взаимного ортам силовых винтов, и кинематического винта-градиента.

В результате решения обратной задачи о положении получены следующие значения обобщенных координат механизма (м):

$$Q = (4,899 \ 3,674 \ 4,989 \ 4,500 \ 5,812 \ 8,485).$$

Матрица плюккеровых координат для заданного положения центров сферических шарниров выходного звена и основания механизма с линейными двигателями не изменилась. Следовательно, заданное положение исследуемого механизма также является сингулярным.

Запишем частные производные по плюккерovým координатам кинематического винта. Частная производная по ξ :

$$\begin{pmatrix} 0 & -0,204 & -0,408 & -1,021 & -2,449 & 1,225 \\ 0 & -0,544 & -0,272 & -0,68 & -1,225 & 2,449 \\ 0 & -0,601 & -0,401 & -0,869 & -0,267 & 0,401 \\ 0 & -0,444 & 0,444 & -0,889 & 0,222 & 0,222 \\ 0 & -0,516 & 0,516 & -1,032 & -0,344 & -0,344 \\ 0 & -0,118 & 0,471 & -2,003 & -0,471 & -0,118 \end{pmatrix}.$$

Частные производные по остальным плюккерovým координатам вычисляются аналогичным образом.

Винт-градиент, наиболее быстро выводящий из состояния сингулярности, имеет плюккерovy координаты:

$$(\xi, \eta, \zeta, \xi^0, \eta^0, \zeta^0) = (1,603 \ -1,520 \ 0,081 \ 0,000 \ -0,241 \ 0,294).$$

В рассматриваемом положении механизма параллельной структуры кинематический винт-градиент, наиболее быстро выводящий из особого положения, не совпадает с единственным кинематическим винтом, взаимным ортам осей пяти независимых силовых винтов, имеющих координаты $(1, 0, 0, 0, 0, 0)$.

Зная винт-градиент, находим плюккерovy координаты пяти кинематических винтов, переводящих в бесконечно близкие соседние особые положения:

- $(1,520 \ 1,603 \ 0,000 \ 0,000 \ 0,000 \ 0,000)$;
- $(-0,081 \ 0,000 \ 1,603 \ 0,000 \ 0,000 \ 0,000)$;
- $(0,000 \ 0,081 \ 1,520 \ 0,000 \ 0,000 \ 0,000)$;
- $(0,000 \ 0,000 \ 0,000 \ 0,000 \ 0,294 \ 0,241)$;
- $(0,000 \ 0,000 \ 0,000 \ 0,241 \ 0,000 \ 0,000)$.

Для рассматриваемого случая координаты точек B, A, C , характеризующих винт-градиент:

$$B = \begin{pmatrix} -0,088 \\ -0,097 \\ -0,079 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 1,363 \\ -1,472 \\ -5,866 \times 10^{-3} \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 0,028 \\ -0,206 \\ -0,073 \end{pmatrix}.$$

Приведем другие виды изображений исследуемого механизма (рис. 5).

При сканировании положения выходного звена с постоянной его ориентацией можно получить «срез» сингулярной поверхности [24]. Рассмотрим одно из положений, соответствующее этой поверхности, при котором центр выходного звена сместился по координатам $(0,5; 0,2; 0,133)$.

Координаты точек выходного звена примут вид:

$$\begin{pmatrix} -3,5 & -2,5 & -1,5 & 1,5 & 2,5 & 3,5 \\ -1,8 & -0,8 & -1,8 & 2,2 & 3,2 & 4,2 \\ 1,133 & 2,133 & 3,133 & 2,133 & 3,133 & 1,133 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

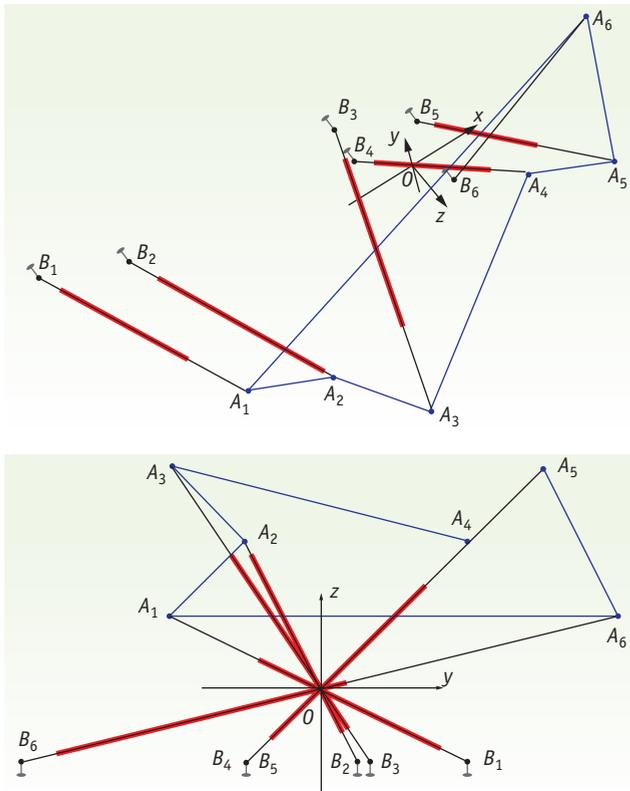


Рис. 5. Конфигурация звеньев механизма при различных направлениях проекций

Координаты единичного вектора силового винта для каждой кинематической цепи найдем аналогично описанному выше случаю, шесть кинематических цепей соответственно дают матрицу PL :

$$PL = \begin{pmatrix} 0,576 & -0,692 & 0,435 & 0 & 2,177 & 3,458 \\ 0,55 & -0,293 & 0,782 & 0 & 3,128 & 1,173 \\ -0,137 & -0,493 & 0,859 & 0 & 0,859 & 0,493 \\ 0,44 & 0,645 & 0,625 & 0 & 0 & 0 \\ 0,318 & 0,678 & 0,663 & 0 & -0,663 & 0,678 \\ 0,326 & 0,913 & 0,246 & 0 & -0,492 & 1,825 \end{pmatrix}.$$

Ранг полученной матрицы 5 – новое положение механизма также является сингулярным (особым). Винт, взаимный ортам осей силовых винтов, не изменился.

Найдем винт-градиент с плюккеровыми координатами $(\xi, \eta, \zeta, \xi^0, \eta^0, \zeta^0)$.

Частная производная по ξ :

$$\begin{pmatrix} 0 & -0,231 & -0,367 & -0,815 & -2,323 & 1,462 \\ 0 & -0,532 & -0,200 & -0,607 & -0,939 & 2,504 \\ 0 & -0,651 & -0,374 & -0,866 & -0,314 & 0,547 \\ 0 & -0,426 & 0,439 & -0,878 & 0,309 & 0,299 \\ 0 & -0,503 & 0,514 & -1,027 & -0,268 & -0,262 \\ 0 & -0,131 & 0,485 & -1,928 & -0,328 & -0,088 \end{pmatrix}.$$

Остальные частные производные аналогичны рассмотренному случаю.

В результате получаем винт-градиент

$$(1,403 \ -1,27 \ 0,00253 \ 0 \ -0,163 \ 0,292).$$

Координаты точек B, A, C , характеризующих винт-градиент:

$$B = \begin{pmatrix} -0,103 \\ -0,114 \\ -0,064 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 1,379 \\ -1,457 \\ -0,061 \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} -0,017 \\ -0,192 \\ -0,064 \end{pmatrix}.$$

Полученное решение представим с учетом расположения звеньев механизма и винта-градиента (рис. 6).

Таким образом, винт-градиент изменился.

ПОСТРОЕНИЕ СИНГУЛЯРНЫХ «ПОВЕРХНОСТЕЙ» ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ОРИЕНТАЦИИ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА

Далее рассмотрим сингулярные «поверхности», получаемые при вращениях выходного звена. Матрица, описывающая ориентацию выходного звена, получается путем перемножения матриц, соответствующих вращениям вокруг каждой из осей.

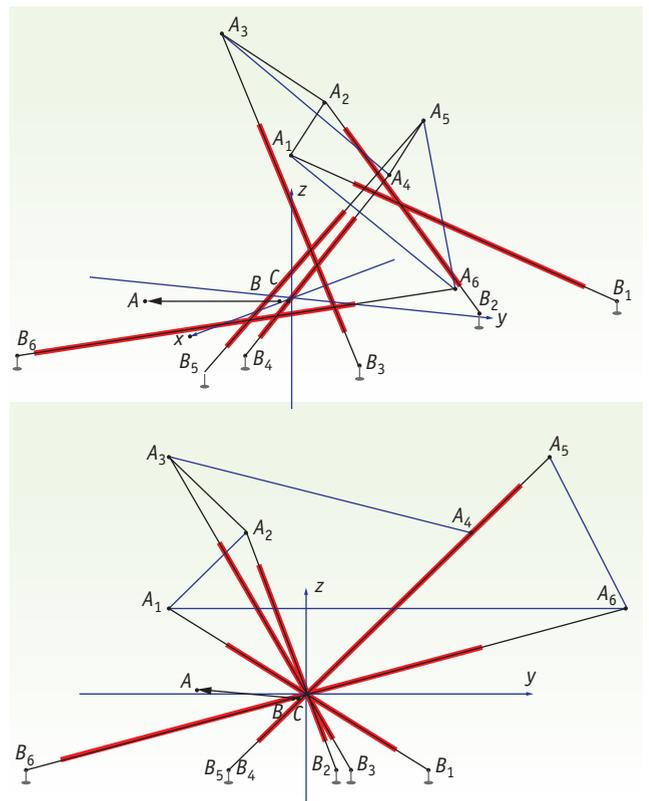


Рис. 6. Положение механизма после смещения центра выходного звена

Вращение вокруг оси Ox :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Матрицы, описывающие вращения вокруг осей Oy и Oz , имеют аналогичный вид. В результате перемножения этих матриц получим матрицу M , описывающую поворот вокруг трех осей. Смещенное положение точек выходного звена будет таковым:

$$A_i' = A_i M, i=1, \dots, 6.$$

Зададим максимальные углы поворота от 0 до 60° для поворотов относительно осей Ox и Oy , для оси Oz максимальный поворот примем от 0 до 180°.

При перемещении из начального положения в конечные будем последовательно увеличивать углы на фиксированные значения, равные одной двадцатой от максимального отклонения. В каждом из полученных положений вычисляем ранг матрицы, сформированной из силовых винтов, действующих на выходное звено со стороны кинематических цепей. При приближении к особому положению определитель матрицы плюккеровых координат стремится к нулю, здесь принято в качестве признака для особого положения, что определитель матрицы силовых винтов по модулю должен быть меньше 0,005. В результате можно получить «поверхности» в координатах α , β , γ , в которых механизм находится в особых положениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлен анализ особых положений механизмов параллельной структуры с линейными двигателями. Данные механизмы имеют широкое поле применения – это двигательные системы, технологические роботы, измерительные и обучающие устройства. Особые положения существенно снижают функциональные возможности, ограничивая рабочую зону. Для того чтобы исключить этот недостаток, можно использовать дополнительные двигатели, однако требуется знать, какие движения переводят в соседние особые положения и какие выводят из них.

На примере относительно простого случая, когда оси всех линейных двигателей пересекают одну прямую линию, установлено, что кинематический винт, описывающий неуправляемое движение, не соответствует кинематическому винту, описывающему движение, наиболее быстро выводящему из особого положения. При этом при изменении точек крепления приводов имеет место изменение

кинематического винта, соответствующего наиболее быстрому выводу из особого положения.

Данное исследование в дальнейшем будет распространено на более сложные случаи особых положений, соответствующих конкретным механизмам параллельной структуры с линейными двигателями, применяемыми в различных областях техники, в частности в станкостроении.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ганиев Р.Ф.** Проблемы механики машин и технологий. Перспективы развития Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Ч. 1 // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 1. С. 3–20.
2. **Ганиев Р.Ф.** Проблемы механики машин и технологий. Перспективы развития Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Ч. 2 // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 3. С. 3–17.
3. **Каляев И.А., Капустян С.Г.** Групповое управление роботами: проблемы, решения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 12. С. 7–12.
4. **Лопота А.В., Спасский Б.А.** Robotics. A View of the Future. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 9. С. 612–615.
5. **Davidson J.K., Hunt K.H.** Robot and Screw Theory: Applications of Kinematics and Statics of Robotics // Oxford University Press, 2004. 467 p.
6. **Воробьев Е.И.** Осуществление заданного относительного движения двух твердых тел двуруким роботом // Механика твердого тела. 2018. № 2. С. 122–128.
7. **Bohigas O., Zlatanov D., Ros L., Manubens M., Porta J.M.** Numerical computation of manipulator singularities // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2012, article number 6225083, pp. 1351–1358.
8. **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.
9. **Диментберг Ф.М.** Теория винтов и ее приложения. М.: Наука, 1978. 336 с.
10. **Sugahara Y. et al.** A Suspended Cable-Driven Parallel Robot for Human-Cooperative Object Transportation // ROMANSY 23 – Robot Design, Dynamics and Control. 2021. PP. 109–117.
11. **Tempel P., Alfeld M., Wijk V.** Design and Analysis of Cable-Driven Parallel Robot CaRISA: A Cable Robot for Inspecting and Scanning Artwork // ROMANSY 23 – Robot Design, Dynamics and Control. 2021. PP. 136–144.

12. **Russo M., Ceccarelli M.** Dynamics of a Humanoid Robot with Parallel Architectures // *Advances in Mechanism and Machine Science. Proceedings of the 15th IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science*. Ed. T. Uhl. Springer. 2019. P. 1799–1808.
13. **Li R., Fan X., Li X., Bai S., Zhang J.** Kinematic Design of a 2-SPS/PU&R 4-DOF Hybrid Robot for Ankle Rehabilitation // *Advances in Mechanism and Machine Science. Proceedings of the 15th IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science*. Ed. T. Uhl. Springer. 2019. P. 1849–1858.
14. **Balderas Hill R., Briot S., Chriette A., Martinet P.** Minimizing the Energy Consumption of a Delta Robot by Exploiting the Natural Dynamics // *ROMANSY 23 – Robot Design, Dynamics and Control*. 2021. P. 213–224.
15. **Nguyen V.L., Kuo C.H., Lin C.Y.** Gravity Compensation of Delta Parallel Robot Using a Gear-Spring Mechanism // *ROMANSY 23 – Robot Design, Dynamics and Control*. 2021. P. 280–287.
16. **Geng J., Arakelian V.** Balancing of Planar 5R Symmetrical Parallel Manipulators Taking into Account the Varying Payload // *ROMANSY 23 – Robot Design, Dynamics and Control*. 2021. P. 372–379.
17. **Harada T., Kunishige Y.** Singularity Free Mode Changes of a Redundantly Driven Two Limbs Six-Dof Parallel Robot // *ROMANSY 23 – Robot Design, Dynamics and Control*. 2021. P. 405–413.
18. **Balchanowski J., Szrek J., Wudarczyk S.** Analysis of constraint equations of the parallel mechanisms with 3 DoF in singular configurations // *Advances in Mechanism and Machine Science. Proceedings of the 15th IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science*. Ed. T. Uhl. Springer. 2019. P. 607–616.
19. **Fomin A., Antonov A., Glazunov V.** Forward Kinematic Analysis of a Rotary Hexapod // *CISM International Centre for Mechanical Sciences 2021*. G. Venture et al. (Eds.): ROMANSY 2020, CISM 601, 2021. PP. 486–494.
20. **Велиев Е.И., Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А., Скворцов С.А., Чернецов Р.А.** Разработка и исследование механизмов с постоянной точкой ввода инструмента в рабочую область, предназначенных для хирургических операций и исследования свойств плазмы // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2020. № 6. С. 3–15.
21. **Хейло С.В., Ларюшкин П.А.** Определение рабочей зоны манипуляторов параллельной структуры // *Справочник. Инженерный журнал*. 2013. № 2. С. 27–31.
22. **Пашенко В.Н., Романов А.В., Артемьев А.В., Меньшова Е.В., Логинов Н.А.** Решение прямой задачи о положении шестистепенного манипулятора параллельной структуры на базе кривошипно-шатунного механизма // *Электронные информационные системы*. 2017. № 4(15). С. 91–101.
23. **Гебель Е.С., Глазунов В.А.** Определение взаимного соответствия кинематического винта выходного звена и винта-градиента в особом положении механизма параллельной структуры // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2017. № 7 (688). С. 3–9.
24. **Гебель Е.С., Гаврилина Л.В., Глазунов В.А., Демидов С.М., Швец П.А.** Построение зоны сингулярности для одного вида механизмов параллельной структуры // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2020. № 3. С. 4–10.
25. Патент Германии № WO 03/037562 AI. Device for the displacement and/or positioning of an object in five axes / МПК В23Q 1/54, опубл. 08.05.2003.
26. **Чунихин А.Ю., Глазунов В.А.** Разработка механизмов параллельной структуры с пятью степенями свободы, предназначенных для технологических роботов // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2017. № 4. С. 3–11.
27. **Arakelian V., Briot S., Glazunov V.** Improvement of functional performance of spatial parallel manipulators using mechanisms of variable structure // *Proceedings of the Twelfth World Congress in Mechanism and Machine Science IFToMM, Besancon, France*. 2007. V. 5. P. 159–164.

ГЕБЕЛЬ Елена Сергеевна –

кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Автоматизация и робототехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ)

ГАВРИЛИНА Любовь Васильевна –

научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

ГЛАЗУНОВ Виктор Аркадьевич –

доктор технических наук, профессор, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

ЛАСТОЧКИН Алексей Борисович –

кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

РОМАНОВ Андрей Александрович –

инженер Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

ДУХОВ Андрей Валерьевич –

начальник группы АО НИИМА «Прогресс»



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Цена 2 600 руб.

Ян Гибсон, Давид Розен, Брент Стакер

ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство

Перевод с англ. книги издательства «Springer»
под ред. д.ф.-м.н., проф. И.В. Шишковского
М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 648 с. ISBN 978-5-94836-447-6

Предисловие к русскому изданию

Я был очень рад, когда услышал, что профессор Игорь Шишковский будет научным редактором русского издания нашей монографии. Обладая многолетним и богатым опытом в данной области, этот известный ученый и педагог сможет гарантировать как техническую точность, так и ясность изложения. Поскольку русский язык является одним из самых распространенных языков в мире, этот перевод позволит значительно расширить аудиторию, которая сможет впервые получить доступ к данной информации. Я надеюсь, что исследователи, студенты и преподаватели найдут эту книгу прекрасным дополнением к своей коллекции, и что она расширит их познания в быстро развивающихся областях аддитивных технологий.

Брент Стакер
профессор, университет Луисвилля (Кентукки, США)

Содержание

Предисловие

- Глава 1.** Введение и описание основных принципов
- Глава 2.** Развитие технологий АП
- Глава 3.** Общая последовательность процесса АП
- Глава 4.** Процесс фотополимеризации в ванне
- Глава 5.** Плавление порошков в сформированном слое
- Глава 6.** Экструзионные системы
- Глава 7.** Распыление материала методом струйной печати
- Глава 8.** Распыление связующего для струйной печати
- Глава 9.** Процессы ламинирования листовых (слоистых) материалов

- Глава 10.** Процессы направленного энерговклада
- Глава 11.** Технологии прямой записи
- Глава 12.** Преимущества бюджетных систем АП
- Глава 13.** Руководство по выбору процесса
- Глава 14.** Постобработка
- Глава 15.** Задачи программного обеспечения в АП
- Глава 16.** Прямое цифровое производство
- Глава 17.** Проектирование для АП
- Глава 18.** Быстрое изготовление инструмента
- Глава 19.** Применения АП
- Глава 20.** Возможности для бизнеса и будущее АП



**ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ:
www.technosphaera.ru**

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По телефону: (495) 234-01-10
E-mail: knigi@technosphaera.ru
sales@technosphaera.ru