

Фролов Александр Владимирович – e-mail: frolov@frolov.moscow; тел.: 89037867374; к.т.н.; начальник отдела.

Medeltsev Anton Aleksandrovich – JSC «СНИАГ»; e-mail: medeltsev@hotmail.com; Moscow, Russia; phone: +79017737331; CAE-engineer.

Shapovalov Petr Anatolievich – e-mail: kinik.keni@yandex.ru; phone: +79267101927; head of laboratory.

Voronov Maksim Vladimirovich – e-mail: duality696@mail.ru; phone: +79177687590; CAE-engineer.

Polukhina Anastasia Igorevna – e-mail: loading1221@yandex.ru; phone: +79162794097; engineer.

Sigaleva Polina Nikolaevna – e-mail: polina@sigaleva.ru; phone: +79153280920; engineer.

Frolov Aleksandr Vladimirovich – e-mail: frolov@frolov.moscow; phone: +79037867374; cand. of eng. sc.; head of division.

УДК 621.865.8

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-152-162

Д.И. Малышев, Л.А. Рыбак, А.С. Писаренко, В.В. Черкасов

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СИНГУЛЯРНОСТЕЙ НА РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ И ГЕОМЕТРИЮ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ПЛАТФОРМЫ ГОФА-СТЮАРТА*

Одним из обязательных требований при проектировании механизмов параллельной структуры является исключение из рабочей области особых положений, в которых механизм теряет свою управляемость и могут возникать сбои в работе. Анализ рабочей области механизмов параллельной структуры сложнее аналогичного для механизмов последовательной структуры, особенно если механизм имеет более трех степеней свободы. В статье рассмотрена задача анализа влияния особых положений на решение прямой задачи кинематики и геометрию рабочего пространства 3/6 платформы Гофа-Стюарта (коммерческое название - «Гексапод»). Разработан численный алгоритм решения прямой задачи о положениях платформы. Он основан на непосредственном использовании системы уравнений кинематических связей платформы. Аппроксимация множества решений системы уравнений выполнена на основе детерминированных методов глобальной оптимизации. Выполнен анализ изменения количества решений прямой задачи кинематики вблизи зоны особого положения. Анализ состоит из двух этапов. Первый этап заключается в решении обратной задачи кинематики для положения и ориентации платформы, при котором возникает особое положение. Второй этап заключается в решении прямой задачи кинематики для случая особого положения и случая вблизи особого положения. В результате решения прямой задачи кинематики выявлено различное количество решений прямой задачи кинематики для различных случаев. Синтезирован алгоритм, позволяющий определить рабочее пространство, свободное от особых положений, для заданных диапазонов изменения углов ориентации платформы, заданных углами Эйлера. Проведён анализ зависимости изменения объёма рабочей области в зависимости от диапазона изменения углов ориентации платформы. Алгоритмы реализованы программно на языке программирования C++. Моделирование выполнено с использованием параллельных вычислений и реализацией экспорта трёхмерных моделей положений платформы и рабочей области в универсальный формат трёхмерных моделей STL.

Особые положения; платформа Гофа-Стюарта; прямая задача кинематики; рабочая область; обратная задача кинематики.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01614.

D.I. Malyshev, L.A. Rybak, A.S. Pisarenko, V.V. Cherkasov

ANALYSIS OF THE SINGULARITIES INFLUENCE ON THE FORWARD KINEMATICS SOLUTION AND THE GEOMETRY OF THE WORKSPACE OF THE GOUGH-STEWART PLATFORM

One of the obligatory requirements for parallel mechanisms design is the exclusion from the workspace of singularities in which the mechanism loses its controllability and malfunctions may occur. The analysis of the workspace of the mechanisms of a parallel structure is more complicated than that for the mechanisms of a serial structure, especially if the mechanism has more than three degrees of freedom. The article considers the problem of analyzing the influence of singularities on the solution of the forward kinematics and the geometry of the workspace 3/6 of the Gough-Stewart platform (commercial name - "Hexapod"). A numerical algorithm for solving the forward kinematics of platform has been developed. It is based on the direct use of the system of equations of the platform's kinematic constraints. Approximation of the set of solutions to the system of equations is based on deterministic methods of global optimization. An analysis of the change in the number of forward kinematics near the zone of singularities is performed. The analysis consists of two stages. The first stage consists in solving the forward kinematics for the position and orientation of the platform, at which singularities arises. The second stage consists in solving the forward kinematics for the case of a singularity and the case near a singularity. As a result of solving the forward kinematics, a different number of forward kinematics solutions for different cases was revealed. An algorithm has been synthesized that makes it possible to determine a singularity-free workspace free for given ranges of change in the platform orientation angles specified by Euler angles. An analysis of the dependence of the change in the volume of the workspace depending on the range of change in the angles of the platform orientation was carried out. The algorithms are implemented programmatically in the C++ programming language. The modeling was performed using parallel computing and the implementation of the export of three-dimensional models of the positions of the platform and workspace to the universal format of three-dimensional models STL.

Singularities; Gough-Stewart platform; forward kinematics; workspace; inverse kinematics.

Введение. Вопросы проектирования и управления роботами и роботизированными системами являются актуальными и рассмотрены во многих работах отечественных ученых [1–5]. Роботы на основе механизмов параллельной структуры имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными механизмами последовательной структуры [6, 7], основными преимуществами которых является высокая грузоподъемность и скорость перемещения. Недостатком таких структур является появление особых положений, при которых робот лишается степени свободы или теряет управляемость, что может привести к неконтролируемой ситуации или поломке. В связи с этим возникает задача анализа рабочего пространства с учётом условия исключения особых положений. Особые положения бывают двух видов: граничные особые положения и внутренние особые положения [8]. Один из методов анализа особых положений основан на определителе матрицы Якоби, полученной в результате дифференцирования функций зависимости входных и выходных координат. С. Gosselin и J. Angeles в своей работе [9] описали условия возникновения особых положений, когда матрица Якоби входных или выходных координат является вырожденной (определитель матрицы равен 0). Причем вырожденная матрица Якоби, состоящая из частных производных функций прямой задачи кинематики по входным координатам, соответствует особому положению на внешней границе рабочей области или внутренней границе, разделяющей субрегионы рабочего пространства. Вырожденная матрица, состоящая из частных производных функций обратной задачи кинематики по выходным координатам, соответствует особому положению, которое обычно находится внутри рабочей области и соответствует положению, где происходит изменение количества решений прямой задачи кинематики.

Сложность вычисления матрицы Якоби существенно возрастает при решении задач более чем с тремя степенями свободы, из-за сложности нахождения определителя матрицы. Например, С. Gosselin и J. Wang [10] использовали численные методы для решения обратной задачи кинематики и нахождения всех особых положений механизма внутри рабочей области. Для механизмов параллельной структуры с шестью степенями свободы исследования привели к выявлению некоторых особых положений. К.Н. Hunt в своей работе [11] впервые указал на особое положение, которое возникает, когда все линии, проходящие через ось прямолинейных приводов, пересекают общую линию. Затем Е.Ф. Fichter [12] показал, что особое положение достигается, когда платформа поворачивается вокруг оси, ортогональной плоскости основания, на угол 90° . J.P. Merlet в своих работах [13, 14] предложил подход для определения особых положений, основанный на использовании геометрии грассманиана. J.P. Merlet отметил, что особое положение для платформы Гофа-Стюарта возникает при попадании оси любой из штанг в плоскость подвижной платформы. Используя геометрию грассманиана, определить геометрические условия, которые приводят к особой конфигурации легко, однако сложно выразить их аналитически. Это серьезный недостаток в контексте анализа и проектирования, где очень важно получать аналитические выражения для особых положений. Другой графический способ определения особых положений предложил D. Dönmez [15], он и ещё несколько исследователей предложили метод стереографической проекции. Установлено, что в случае, если четыре из шести направляющих стержней пересекаются друг с другом в общей точке, возникает два различных решения, следовательно, при заданных характеристиках возникает особое положение. В работах [16] М. Slavutin приводит подход определения особых положений различных конфигурации платформ 6/6, основу метода включает применение теоремы Кеннеди. В этих работах также приведено графическое представление особых положений с пояснениями относительно метода их определения.

Анализ существующих исследований показал существенный задел в области анализа особых положений для платформы Гофа-Стюарта. Однако, аналитические методы определения особых положений сложно реализуемы, необходимо наличие высокопроизводительных вычислительных систем. Геометрические методы применимы только для конкретного механизма. В существующих работах не рассмотрена задача исследования рабочей области платформы Гофа-Стюарта для различных диапазонов изменения углов ориентации с учётом особых положений на основе численных методов. В рамках настоящей работы предложены численные алгоритмы решения прямой задачи кинематики и анализа рабочего пространства на основе детерминированных методов глобальной оптимизации.

Математическая модель платформы. Рассмотрим структуру платформы Гофа-Стюарта (рис. 1). Платформа имеет 6 кинематических цепей, которые соединяют неподвижное основание с подвижной платформой, посредством линейных приводов (L_i) и универсальных шарниров у оснований (A_i и B_i). Подвижная платформа представляет собой равносторонний треугольник.

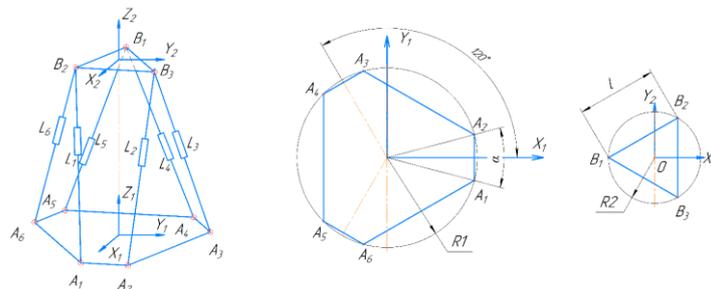


Рис. 1. Структура платформы Гофа-Стюарта

Решение обратной задачи кинематики платформы Гофа-Стюарта для входной координаты L_1 запишем как

$$L_1 = \left((A_{1x} - B_{2x})^2 + (A_{1y} - B'_{2y})^2 + (A_{1z} - B'_{2z})^2 \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где B_{2x}, B_{2y}, B_{2z} – координата точки B_2 в системе координат $X_1Y_1Z_1$ неподвижной платформы. Аналогично определяется значения остальных входных координат. Координаты точек B_i определяются как

$$\mathbf{B}_i = (B_{ix} \ B_{iy} \ B_{iz} \ 1)^T = \mathbf{M} \cdot (B_{ix}^{(2)} \ B_{iy}^{(2)} \ B_{iz}^{(2)} \ 1)^T, \quad (2)$$

где $B_{ix}^{(2)}, B_{iy}^{(2)}, B_{iz}^{(2)}$ – координаты точек B_i в системе координат $X_2Y_2Z_2$ подвижной платформы, \mathbf{M} – матрица преобразования для перехода от подвижной к неподвижной системе координат. Для составления матрицы преобразования используем углы Эйлера (α, β, γ) . Существует много различных систем углов Эйлера и все они описывают ориентацию твердого тела относительно некоторой заданной системы координат. Используем наиболее распространённый вариант системы вращения (рис. 2).

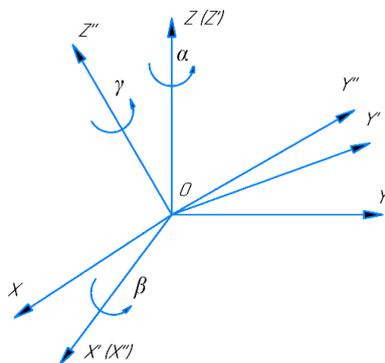


Рис. 2. Углы Эйлера: α – угол прецессии, β – угол нутации и γ – и угол собственного вращения

Введём следующие обозначения: $c_\alpha = \cos(\alpha)$, $s_\alpha = \sin(\alpha)$, $c_\beta = \cos(\beta)$, $s_\beta = \sin(\beta)$, $c_\gamma = \cos(\gamma)$, $s_\gamma = \sin(\gamma)$. В таком случае матрицу преобразования \mathbf{M} запишем как

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} i_x & j_x & k_x & O_x \\ i_y & j_y & k_y & O_y \\ i_z & j_z & k_z & O_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_\alpha c_\gamma - c_\beta s_\alpha s_\gamma & -c_\gamma s_\alpha - c_\alpha c_\beta s_\gamma & s_\beta s_\gamma & O_x \\ c_\beta c_\gamma s_\alpha + c_\alpha s_\gamma & c_\alpha c_\beta c_\gamma - s_\alpha s_\gamma & -c_\gamma s_\beta & O_y \\ s_\alpha s_\beta & c_\alpha s_\beta & c_\beta & O_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где O_x, O_y, O_z – координаты центра O подвижной платформы в системе координат $X_1Y_1Z_1$.

J.P. Merlet в своих работах [13, 14] отметил, что особое положение для платформы Гофа-Стюарта возникает при попадании оси любой из приводных штанг в плоскость подвижной платформы. Из этого следует что особое положение возникает в том случае, когда хотя бы одна из точек A_i принадлежит плоскости подвижной платформы. Условие возникновения особого положения можно записать в следующем виде

$$aA_{ix} + bA_{iy} + cA_{iz} + d = 0, \quad (4)$$

где a, b, c, d – коэффициенты уравнения плоскости подвижной платформы, которые определяются как

$$a = k_x, b = k_y, c = k_z, d = k_x O_x + k_y O_y + k_z O_z.$$

Анализ влияния особых положений на решение прямой задачи кинематики. Выполним анализ взаимосвязи особых положений и количества решений прямой задачи кинематики платформы. Решение прямой задачи кинематики состоит в определении положения и ориентации центра подвижной платформы – точки O . Её координаты O_x, O_y, O_z и углы ориентации плоскости подвижной платформы α, β, γ (углы Эйлера) определим, используя координаты вершин B_i подвижной платформы, представляющей собой правильный треугольник

$$O_x = \frac{\sum B_{ix}}{3}, O_y = \frac{\sum B_{iy}}{3}, O_z = \frac{\sum B_{iz}}{3}. \quad (5)$$

Углы Эйлера, учитывая (3) можно определить, как

$$\beta = \arccos(k_z), \alpha = \arccos\left(\frac{j_z}{\sin(\beta)}\right), \gamma = \arccos\left(\frac{-k_y}{\sin(\beta)}\right) \quad (6)$$

При этом значения j_z, k_y, k_z определим, используя координаты точек B_i . Так как B_1 лежит на оси абсцисс в своей локальной системе координат (рис. 1), можно найти вектор I , коллинеарный преобразованной оси $O_1 X_1$

$$\vec{I} = (I_x, I_y, I_z) = -1 \cdot (O_x - B_{1x}, O_y - B_{1y}, O_z - B_{1z}),$$

Преобразуем вектор I в единичный вектор i

$$\vec{i} = \left(I_x / (I_x^2 + I_y^2 + I_z^2)^{1/2}, I_y / (I_x^2 + I_y^2 + I_z^2)^{1/2}, I_z / (I_x^2 + I_y^2 + I_z^2)^{1/2} \right).$$

Найдем вектор оси $O_1 Z_1$ определим как $\vec{k} = \vec{i} \times \vec{m}$, где \vec{m} – единичный вектор $O_1 B_3$.

Единичный вектор \vec{j} определим как $\vec{j} = \vec{i} \times \vec{k}$.

Таким образом, с учётом формул (5), (6), решение прямой задачи кинематики сводится к определению положения точек B_i для заданных длин штанг. Для этого составим систему уравнений:

$$\begin{cases} g_1(x) = 0, \\ \dots \\ g_9(x) = 0 \\ a_i \leq x_i \leq b_i, i = 1, \dots, 9. \end{cases}, \quad (7)$$

где $g_j(x)$ – функции кинематических связей платформы между шарнирами подвижной и неподвижной платформ, а также шарниров подвижной платформы между собой, то есть $g_1(x) = (B_{3x} - A_{1x})^2 + (B_{3y} - A_{1y})^2 + (B_{3z} - A_{1z})^2 - L_1^2, \dots, g_9(x) = (B_{3x} - B_{1x})^2 + (B_{3y} - B_{1y})^2 + (B_{3z} - B_{1z})^2 - l^2$.

Система (7) включает 9 переменных x_i , соответствующих координатам вершин B подвижной платформы. Для аппроксимации множества решений этой системы может быть использован алгоритм на основе методов интервального анализа [17, 18], рассмотренный ранее в работе [19] для решения прямой задачи кинематики плоского механизма с тремя степенями свободы. Для ускорения его выполнения используем параллельные вычисления. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 3.

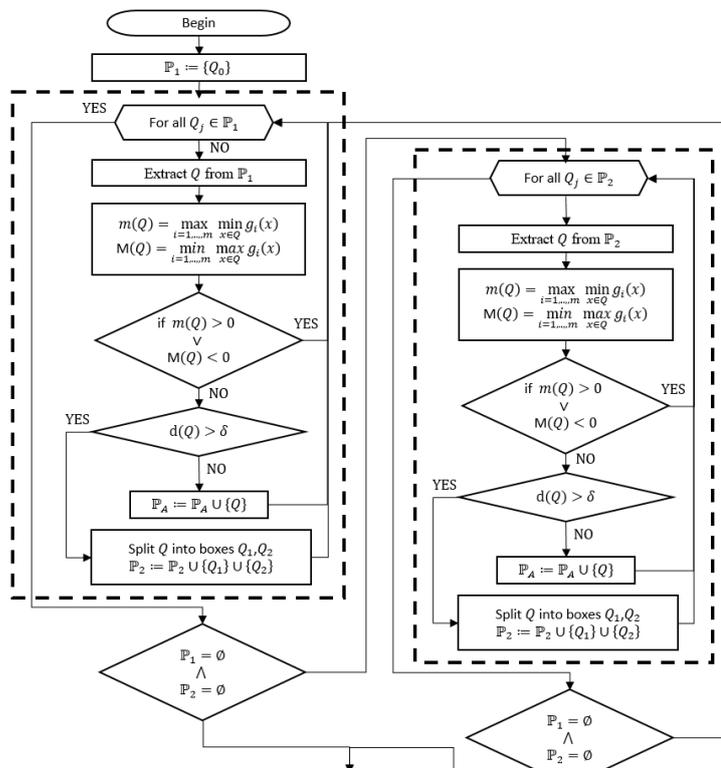


Рис. 3. Алгоритм решения прямой задачи кинематики

Интервалы переменных, соответствующих координатам точек B , заданы в виде – мерных параллелепипедов. Начальный параллелепипед Q_0 , который включает в себя весь набор решений X , определяется ограничениями интервалов $a_i \leq x_i \leq b_i, i = 1, \dots, 9$. Он вносится в список \mathbb{P}_1 . Извлечём произвольный параллелепипед Q . Пусть $m(Q) = \max_{i=1, \dots, 9} \min_{x \in B} g_i(x)$ и $M(Q) = \min_{i=1, \dots, 9} \max_{x \in B} g_i(x)$. Если $m(Q) > 0$ или $M(Q) < 0$, то Q не содержит решений для системы (7). Исключим такие параллелепипеды. Если параллелепипед не может быть исключён, он разделяется на два меньших параллелепипеда, если его диаметр не меньше заданной точности δ , и вносится в список \mathbb{P}_2 . Когда список \mathbb{P}_1 становится пуст, процедура проверки проводится для параллелепипедов из списка \mathbb{P}_2 . Те из них, что не могут быть исключены, делятся на 2 меньших параллелепипеда и вносятся в \mathbb{P}_1 . Проверки параллелепипедов в списках выполняются с использованием параллельных вычислений. Эти циклы выделены на рисунке 3 пунктирными линиями. Покрытие представляет собой множество параллелепипедов \mathbb{P}_A с диаметром, меньшим или равным заданной точности аппроксимации δ .

На основе предложенного алгоритма выполним анализ влияния особых положений на решение прямой задачи кинематики платформы. Анализ состоит из двух этапов. Первый этап заключается в решении обратной задачи кинематики, используя формулы (1), (2) для положения и ориентации платформы, при котором возникает особое положение в соответствии с условием (4). Второй этап заключается в решении прямой задачи кинематики для случая особого положения и случая вблизи особого положения.

В результате решения прямой задачи кинематики для случая особого положения было выявлено пять возможных положений. Координаты центра O подвижной платформы и углы Эйлера α, β, γ для каждого из пяти решений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Решения прямой задачи кинематики

№	O_x	O_y	O_z	α	β	γ
1	7.25	0	797.02	90	-70.05	-90
2	-38.77	101.57	727.01	135.96	110.7	43.97
3	-191.45	-1.41	730.95	94.77	172.37	95.27
4	-58.01	-0.42	694.61	89.57	37.92	90.5
5	-38.83	-101.67	727.04	44.08	110.77	136.04

Первое решение согласно табл. 1 (рис. 4,а) соответствует особому положению. Анализируя проекции положения платформы на плоскости, можно сделать вывод, что оси штанг L_4 и L_5 принадлежат плоскости подвижной платформы $B_1B_2B_3$. При изменении длин звеньев L_4 и L_5 в результате решения прямой задачи выявлено 2 возможных достижимых положения подвижной платформы вблизи особого положения (рис. 5). Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод что при прохождении особого положения изменяется количество решений прямой задачи кинематики, что может привести к заклиниванию и сбою в работе. Соответственно, это должно быть учтено при проектировании.

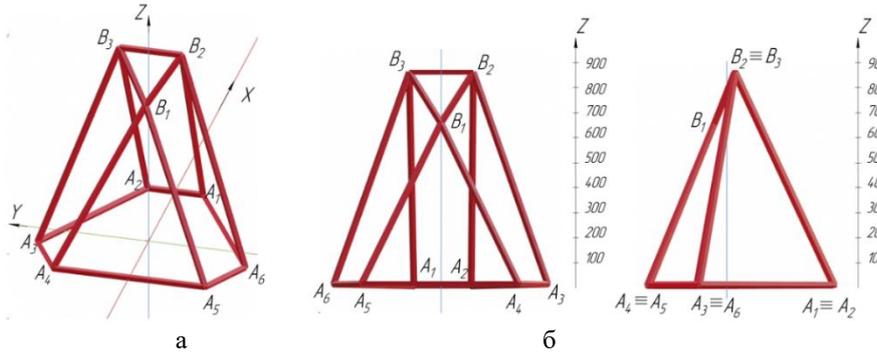


Рис. 4. Конфигурация платформы Гофа-Стюарта в особом положении: а – изометрия, б – проекции на плоскости

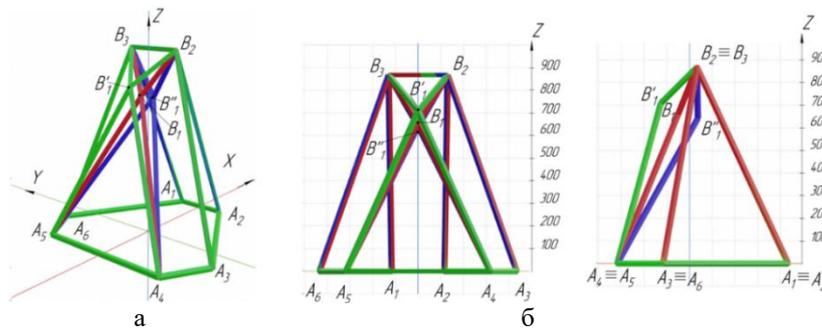


Рис. 5. Сравнение результатов решения прямой задачи кинематики вблизи особого положения: а – изометрия, б – проекции на плоскости

Анализ влияния особых положений на геометрию рабочей области. Рассмотрим задачу определения рабочей области, внутри которой любое положение платформы достижимо при любой ориентации платформы в пределах заданных диапазонов изменения углов Эйлера при условии отсутствия особых положений. Для этого введём следующие ограничения:

- ◆ на длины штанг L : $L_i \in [L_{min}; L_{max}]$;
- ◆ на положение и ориентацию платформы для исключения особых положений. Оно может быть учтено добавлением условия положительности левой части уравнения (4).

Алгоритм определения рабочей области состоит в итерационном переборе с дискретным шагом δ координат платформы, которые могут принадлежать рабочей области. Значения координат добавляются в покрытие рабочей области, если при любых значениях углов из диапазонов изменения углов ориентации, выполняются условия в соответствии с ограничениями на длины штанг и на положение и ориентацию платформы для исключения особых положений. Для этого вычисляются длины штанг с использованием формул (1)-(2) и значение функции левой части уравнения (4) для каждой из штанг. Добавление в покрытие рабочей области предполагает внесение в упорядоченное множество целых чисел для уменьшения объёма данных при сохранении заданной точности [20]. Рассмотренный алгоритм реализован на языке программирования C++ с использованием параллельных вычислений и реализацией экспорта в трёхмерную STL модель.

Выполним моделирование для следующих параметров: $L_{min} = 600$ мм, $L_{max} = 1000$ мм, $\varphi = 30^\circ$, $R_1 = 450$ мм, $R_2 = 150$ мм, $\delta = 10$ мм. На рис. 6 показаны результаты моделирования в изометрии и в проекциях на плоскости.

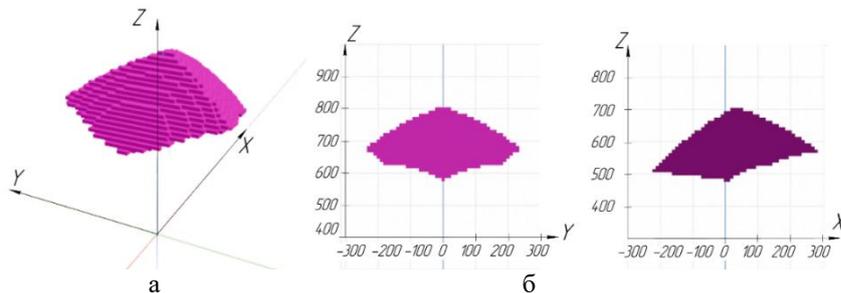


Рис. 6. Рабочая область: а – изометрия, б – проекции на плоскости

Выполним анализ зависимости объёма рабочей области от диапазона изменения углов Эйлера для следующих ограничений на длины штанг: $L_{min} = 500$ мм, $L_{max} = 1000$ мм. В процессе моделирования диапазон углов Эйлера последовательно увеличивался для всех углов от $\pm 0^\circ$ до $\pm 90^\circ$ с шагом 1° . График зависимости объёма рабочей области от диапазона углов представлен на рис. 7. Оранжевой линией показано изменение объёма рабочей области с ограничением только на длины штанг, пунктирной чёрной – объёма рабочей области с учётом условия возникновения особых положений.

Из графика видно, что особые положения внутри рабочей области возникают при диапазоне углов Эйлера $\pm 15^\circ$, однако процент рабочего пространства, достичь которого невозможно без прохождения особых положений составляет менее 5% до диапазона $\pm 43^\circ$. При дальнейшем увеличении диапазона углов особые положения оказывают значительное влияние на объём рабочей области. Для диапазона $\pm 58^\circ$ не существует ни одного положения, при котором все ориентации платформы достижимы без прохождения особых положений.

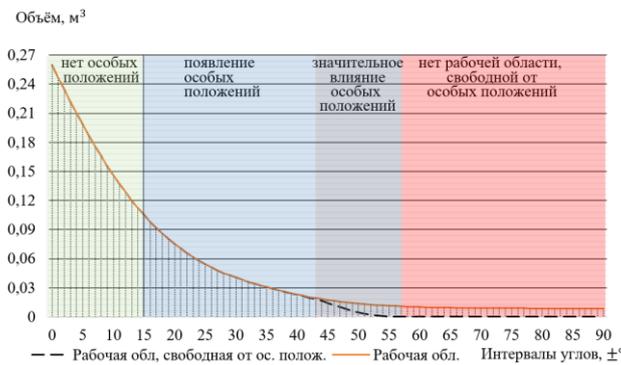


Рис. 7. Зависимость объема рабочей области от диапазона изменения углов Эйлера

Заключение. Выполнен анализ влияния особых положений на решение прямой задачи кинематики для платформы Гофа-Стюарта. Выявлено, что количество решений прямой задачи кинематики изменяется при попадании в зону сингулярности. При изменении значений приводных координат платформа может переместиться в одно из двух возможных положений, что может привести к заклиниванию и сбою в работе. Исследовано также влияние особых положений на геометрию рабочей области. Синтезирован алгоритм, позволяющий определить рабочее пространство, свободное от особых положений для заданных диапазонов изменения углов ориентации платформы. Выявлено, что зоны сингулярности внутри рабочей области возникают в диапазоне углов Эйлера $\pm 15^\circ$. При диапазонах углов свыше $\pm 43^\circ$ особые положения оказывают значительное влияние на объем рабочей области. Для диапазона $\pm 58^\circ$ не существует ни одного положения, при котором все ориентации платформы достижимы без прохождения особых положений. Полученные результаты могут быть использованы для рационального выбора параметров платформы с учетом наличия зон сингулярности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Костюков В.А., Гайдук А.Р., Федоренко Р.В., Гуренко Б.В., Крухмалев В.А., Медведева Т.Н. Проектирование роботов и робототехнических систем. – Ростов-на-Дону, 2014. – 196 с.
2. Каляев И.А., Лохин В.М., Макаров И.М., Манько С.В., Романов М.П., Юревич Е.И. Интеллектуальные роботы. – М., 2007. – 360 с.
3. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М., 2009. – 280 с.
4. Глазунов В.А., Есина М.Г., Быков Р.Э. Управление механизмами параллельной структуры при переходе через особые положения // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – № 2. – С. 78-84.
5. Глазунов В.А., Чунихин А.Д. Развитие исследований механизмов параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – № 3. – С. 37-43.
6. Merlet J.-P. Parallel Robots. – Kluwer Academic Publishers, 2000. – 355 p.
7. Kong X, Gosselin C.M. A class of 3-dof translational parallel manipulator with linear input/output equations // Workshop on Fundamental Issues and Future Research for Parallel Mechanisms and Manipulators, Québec City, Québec, Canada - 2002. – P. 25-32.
8. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. – Stanford University: Stanford, CA, USA, 2018. – P. 105-108.
9. Gosselin C.M., Angeles J. Singularity analysis of closed-loop kinematic chains // Transactions on Robotics and Automatics, IEEE. – 1990. – Vol. 6 (3). – P. 281-290.
10. Gosselin C.M., Wang J. Singularity loci of planar parallel manipulators // Ninth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Milano, Italy, 1995. – P. 1982-1986.

11. *Hunt K.H.* Kinematic Geometry of Mechanisms. – Oxford, UK: Oxford University Press, 1978. – 465 p.
12. *Fichter E.F.* A stewart platform-based manipulator: General theory and practical construction // *The International Journal of Robotics Research*. – 1986. – Vol. 5 (2). – P. 157-182.
13. *Merlet J.-P.* Parallel manipulators part 2: Singular configurations and grassmann geometry // Technical report, INRIA, Sophia Antipolis, France, 1989. – Vol. 8 (5). – P. 45-56.
14. *Merlet J.-P.* Singular configurations of parallel manipulators and Grassmann geometry // *The International Journal of Robotics Research*. – 1989. – Vol. 8 (5). – P. 45-56.
15. *Dönmez D., Akçalı I.D., Avşar E., Aydın A., Mutlu H.* Determination of particular singular configurations of Stewart platform type of fixator by the stereographic projection method // *Inverse Problems in Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 29 (13). – P. 2925-2943.
16. *Slavutin M., Sheffer A., Shai O.* A Complete Geometric Singular Characterization of the 6/6 Stewart Platform // *Journal of Mechanisms and Robotics*. – 2018. – Vol. 10 (4).
17. *Merlet J.-P.* Interval Analysis and Robotics // *Tracts in Advanced Robotics*. – 2010. – Vol. 66. – P. 147-156.
18. *Malyshev D., Posypkin M., Rybak L., Usov A.* Approaches to the determination of the working area of parallel robots and the analysis of their geometric characteristics // *Engineering Transactions*. – 2019. – Vol. 67, No. 3. – P. 333-345.
19. *Rybak L.A., Gaponenko E.V., Malyshev D.I., Virabyan L.G.* The algorithm for planning the trajectory of the 3-RPR robot, taking into account the singularity zones based on the method of non-uniform covering // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 489, No. 1. – 012060.
20. *Rybak L., Malyshev D., Gaponenko E.* Optimization Algorithm for Approximating the Solutions Set of Nonlinear Inequalities Systems in the Problem of Determining the Robot Workspace // *Communications in Computer and Information Science*. – 2020. – Vol. 1340. – P. 27-37.

REFERENCES

1. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Kostyukov V.A., Gayduk A.R., Fedorenko R.V., Gurenko B.V., Krukhmalev V.A., Medvedeva T.N.* Proektirovanie robotov i robototekhnicheskikh sistem [Design of robots and robotic systems]. Rostov-on-Don, 2014, 196 p.
2. *Kalyaev I.A., Lokhin V.M., Makarov I.M., Man'ko S.V., Romanov M.P., Yurevich E.I.* Intellektual'nye roboty [Intelligent robots]. Moscow, 2007, 360 p.
3. *Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G.* Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Models and algorithms of collective control in groups of robots]. Moscow, 2009, 280 p.
4. *Glazunov V.A., Esina M.G., Bykov R.E.* Upravlenie mekhanizmami parallel'noy struktury pri perekhode cherez osobye polozheniya [Control of the mechanisms of a parallel structure when passing through special provisions], *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability], 2004, No. 2, pp. 78-84.
5. *Glazunov V.A., Chunikhin A.D.* Razvitie issledovaniy mekhanizmov parallel'noy struktury [Development of research into the mechanisms of a parallel structure], *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability], 2014, No. 3, pp. 37-43.
6. *Merlet J.-P.* Parallel Robots. Kluwer Academic Publishers, 2000, 355 p.
7. *Kong X, Gosselin C.M.* A class of 3-dof translational parallel manipulator with inear input/output equations, *Workshop on Fundamental Issues and Future Research for Parallel Mechanisms and Manipulators, Québec City, Québec, Canada – 2002*, pp. 25-32.
8. *Craig J.J.* Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Stanford University: Stanford, CA, USA, 2018, pp. 105-108.
9. *Gosselin C.M., Angeles J.* Singularity analysis of closed-loop kinematic chains, *Transactions on Robotics and Automatics, IEEE*, 1990, Vol. 6 (3), pp. 281-290.
10. *Gosselin C.M., Wang J.* Singularity loci of planar parallel manipulators, Ninth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Milano, Italy, 1995, pp. 1982-1986.
11. *Hunt K.H.* Kinematic Geometry of Mechanisms. Oxford, UK: Oxford University Press, 1978, 465 p.
12. *Fichter E.F.* A stewart platform-based manipulator: General theory and practical construction, *The International Journal of Robotics Research*, 1986, Vol. 5 (2), pp. 157-182.

13. Merlet J.-P. Parallel manipulators part 2: Singular configurations and grassmann geometry, *Technical report, INRIA, Sophia Antipolis, France, 1989*, Vol. 8 (5), pp. 45-56.
14. Merlet J.-P. Singular configurations of parallel manipulators and Grassmann geometry, *The International Journal of Robotics Research*, 1989, Vol. 8 (5), pp. 45-56.
15. Dönmez D., Akçalı I.D., Avşar E., Aydın A., Mutlu H. Determination of particular singular configurations of Stewart platform type of fixator by the stereographic projection method, *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2021, Vol. 29 (13), pp. 2925-2943.
16. Slavutin M., Sheffer A., Shai O. A Complete Geometric Singular Characterization of the 6/6 Stewart Platform, *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2018, Vol. 10 (4).
17. Merlet J.-P. Interval Analysis and Robotics, *Tracts in Advanced Robotics*, 2010, Vol. 66, pp. 147-156.
18. Malyshev D., Posypkin M., Rybak L., Usov A. Approaches to the determination of the working area of parallel robots and the analysis of their geometric characteristics, *Engineering Transactions*, 2019, Vol. 67, No. 3, pp. 333-345.
19. Rybak L.A., Gaponenko E.V., Malyshev D.I., Virabyan L.G. The algorithm for planning the trajectory of the 3-RPR robot, taking into account the singularity zones based on the method of non-uniform covering, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 489, No. 1, 012060.
20. Rybak L., Malyshev D., Gaponenko E. Optimization Algorithm for Approximating the Solutions Set of Nonlinear Inequalities Systems in the Problem of Determining the Robot Workspace, *Communications in Computer and Information Science*, 2020, Vol. 1340, pp. 27-37.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Т.А. Дуюн.

Мальшев Дмитрий Иванович – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; e-mail: malyshev.d.i@ya.ru; г. Белгород, Россия; тел.: +79507134397; м.н.с.

Рыбак Лариса Александровна – e-mail: rlbgtu@gmail.com; тел.: +74722230530; д.т.н.; профессор; директор НИИ Робототехники и систем управления.

Писаренко Антон Сергеевич – e-mail: anton42@yandex.ru; тел.: +79803205616; инженер–исследователь.

Черкасов Владислав Витальевич – e-mail: odaguv99@gmail.com; тел.: +79805253793; инженер–исследователь.

Malyshev Dmitry Ivanovich - Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: malyshev.d.i@ya.ru; Belgorod, Russia; phone: +79507134397; junior researcher.

Rybak Larisa Alexandrovna - e-mail: rlbgtu@gmail.com; phone: +74722230530; dr. of eng. sc.; professor; Director of Research Institute of Robotics and Control Systems.

Pisarenko Anton Sergeevich - e-mail: anton42@yandex.ru; phone: +79803205616; research engineer.

Cherkasov Vladislav Vitalevich - e-mail: odaguv99@gmail.com; phone: +79805253793; research engineer.

УДК 62-93

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-162-172

А.В. Логунов, А.Л. Береснев

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПОДХОДА ДЛЯ ДИАГНОСТИКА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Работа посвящена проблеме диагностирования двигателя внутреннего сгорания транспортных средств эта проблема сейчас наиболее актуально из-за постоянного роста автопарка и ужесточения требований к безопасной эксплуатации. Своевременный и точный контроль состояния двигателя внутреннего сгорания способен предотвратить выход