

УДК 621.01 + 007.52

doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-41-48

Разработка и анализ механизма параллельной структуры с линейными приводами, расположенными на основании под разными углами к его плоскости

Ю.В. Родионов¹, А.Н. Сухоставский², А.А. Романов¹,
А.В. Духов³, И.В. Пелин⁴

¹ ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»

² АО «Газпром космические системы»

³ АО «НИИМА «Прогресс»

⁴ ООО «Битроботикс»

Design and Analysis of Parallel Mechanism with Linear Drives Located on the Base at Specified Angles

Y.V. Rodionov¹, A.N. Sukhostavskiy², A.A. Romanov¹,
A.V. Dukhov³, I.V. Pelin⁴

¹ Federal State Budgetary Institution of Science Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

² JSC Gazprom space systems

³ JSC Progress MRI

⁴ JSC Bitrobotics

Рассмотрен новый механизм параллельной структуры с линейными приводами, расположенными на основании под разными углами к его плоскости. Такая компоновка позволяет осуществлять взаимное движение между объектами под водой или в космосе (в агрессивных средах). Новая архитектура механизма компактна для транспортирования и эффективна в эксплуатации при агрессивной внешней среде. Проведен структурный синтез, рассчитано число степеней свободы выходного звена. Предложен общий подход к решению обратной задачи о положениях. Приведено ее решение на примере одной кинематической цепи. При решении задачи о положениях применены матрицы Денавита — Хартенберга. Положение выходного звена, описанное этой матрицей, использовано для представления его точек в системе координат основания. Применены уравнения связей, представляющие собой расстояния между точками основания и выходного звена.

Ключевые слова: механизм параллельной структуры, число степеней свободы, структура механизма, обратная задача о положениях

The article considers a novel parallel mechanism with drives located on the base at different angles to its plane. This arrangement allows performing a relative movement between objects under water or in space (in aggressive environments). The new mechanism topology is compact for transportation and efficient for operation in aggressive environments. Structural synthesis has been performed; the number of degrees of freedom of the output link was calculated. A general approach to solving the inverse kinematics problem of positions is proposed and an example for a kinematic chain is shown. Denavit — Hartenberg matrices are used to solve the problem of positions. The position of the output link described by this matrix is used to represent the points of this link in the base coordinate system. The con-

straint equations are applied, which are the distances between the points of the base and the output link.

Keywords: parallel structure mechanism, number of degrees of freedom, mechanism structure, inverse problem of positions

Механизмы параллельной структуры (МПС) являются темой многих монографий и публикаций благодаря уникальным свойствам [1–6]. Эти устройства применяют в медицинских приборах, технологических системах, тренажерах, 3D-принтерах и многих других устройствах [7–11]. Для реализации различного рода задач целесообразно так синтезировать МПС, чтобы этот объект наиболее полно соответствовал указанной задаче, тем самым на ранних этапах проектирования можно было бы решить вопросы, связанные с управлением, точностью, динамикой и т. д.

Например, для проектов, связанных с возведением временных сооружений, расположенных под водой или на других планетах, целесообразно расположить приводы МПС так, чтобы их направляющие были размещены под разными углами к плоскости основания. При этом возникает возможность достаточно компактного расположения всех элементов данной системы при ее транспортировании. Вместе с тем при работе такого устройства рабочая зона будет вполне приемлемой.

Направляющие, по которым перемещаются линейные двигатели, расположены так, чтобы каждая пара из шести направляющих сходилась на разной высоте над плоскостью основания. При этом возникает возможность сооружать объекты, имеющие форму усеченного конуса, либо работать внутри подобного объекта.

Известны МПС, в которых приводы размещены на основании, а их направляющие — в горизонтальной или вертикальной плоскости [2, 4, 5, 12–14].

Цель работы — рассмотреть МПС с направляющими, расположенными на основании под разными углами к его плоскости [15], исследовать структуру МПС, определить число степеней свободы и предложить вариант решения задачи о положениях.

Структура МПС с направляющими, расположенными под разными углами к основанию. Первичное моделирование и проектирование такого механизма (рис. 1) проведено с помощью программного обеспечения SolidWorks

Research Premium 2021 компании Dassault Systemes, являющегося нематериальным активом Центра коллективного пользования ИМАШ РАН «Научные технологии создания машин будущего».

Предлагаемый МПС содержит шесть кинематических цепей, каждая из которых имеет соединение с линейными двигателями, установленными на основании, две сферические кинематические пары и промежуточное звено, расположенное между ними (см. рис. 1).

Рассматриваемый пространственный механизм включает в себя основание, выходное звено (ВЗ) и кинематические цепи, соединяющие линейные приводы с ВЗ. Основание состоит из трех пар равномерно расположенных по кругу стоек разной длины, связанных между собой таким образом, что каждая короткая стойка соединена с вершинами смежных длинных стоек посредством наклонных направляющих, выполненных в виде пары штанг.

На штангах установлены линейные приводы с возможностью управляемого перемещения. Каждый привод шарнирно связан с промежуточным звеном одной из шести кинематических цепей, которые сопряжены с ВЗ, представ-

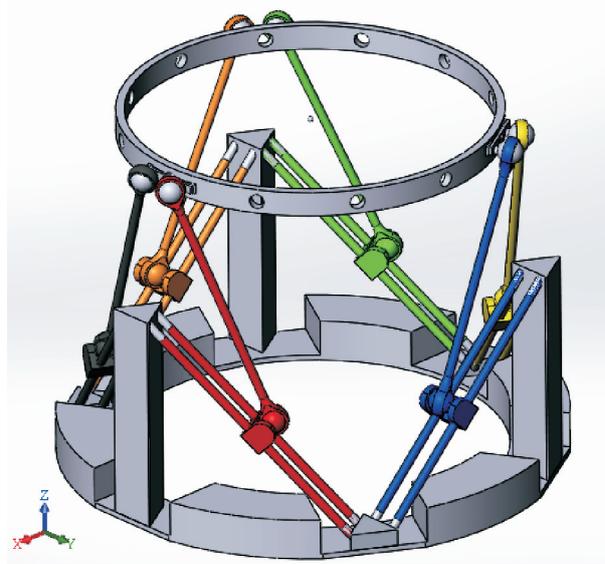


Рис. 1. Модель МПС с направляющими, расположенными под углом 45° к плоскости основания

ляющим собой замкнутое кольцо, в трех местах с помощью пар спаренных шарниров.

С помощью формулы П.О. Сомова и А.П. Малышева определим число степеней свободы ВЗ

$$W = 6(n - 1) - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1, \quad (1)$$

где n — число звеньев, включая основание; p_5, \dots, p_1 — число кинематических пар пятого (одноподвижных), четвертого (двуподвижных), третьего, второго и первого класса соответственно.

В исследуемом МПС число звеньев $n = 14$; $p_5 = 6$; $p_4 = 0$; $p_3 = 12$. После подстановки указанных значений в уравнение (1) получим

$$W = 6 \cdot (14 - 1) - 5 \cdot 6 - 4 \cdot 0 - 3 \cdot 12 - 2 \cdot 0 - 0 = 12.$$

Механизм имеет шесть степеней свободы движения ВЗ и шесть степеней свободы вращения промежуточных звеньев вокруг собственной оси. Последние шесть подвижностей являются местными и не влияют на общее число степеней свободы ВЗ. Их наличие обеспечивает более равномерный износ элементов сферических пар. Таким образом, число степеней свободы рассматриваемого механизма при учете движений лишь ВЗ относительно основания (стойки) равно шести.

Правильность математического моделирования числа степеней свободы механизма (см. рис. 1) по формулам П.О. Сомова и А.П. Малышева подтверждена с помощью программного обеспечения SolidWorks Research Premium 2021.

Решение обратной задачи о положениях для МПС с направляющими, расположенными под разными углами к основанию. Суть решения обратной задачи о положениях заключается в определении зависимости между движением ВЗ механизма и приводами. Исходным положением будем считать такое положение ВЗ, когда оно расположено соосно основанию, т. е. плоскость ВЗ параллельна плоскости основания МПС. Центральные точки основания и ВЗ лежат на вертикальной прямой, параллельной оси OZ , а каретки расположены в середине направляющих (см. рис. 1).

Возьмем произвольное положение ВЗ для решения обратной задачи о положениях. Модель МПС построим с помощью программного обеспечения SolidWorks Research Premium 2021 (рис. 2).

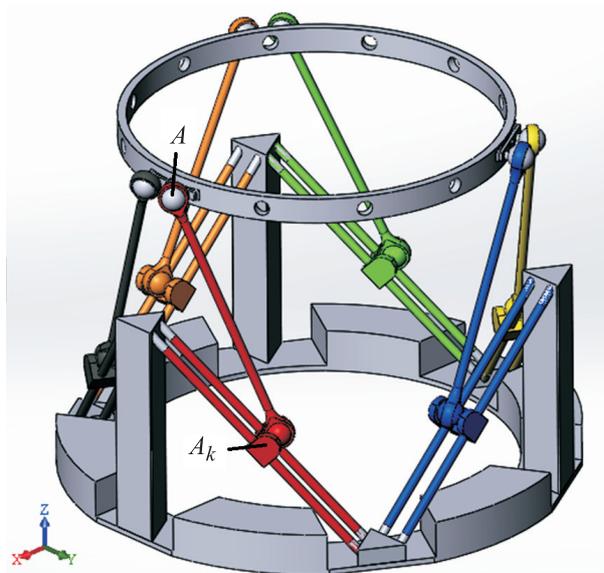


Рис. 2. Модель МПС с произвольным расположением ВЗ

Для решения обратной задачи необходимо задать координаты центральной точки ВЗ $O1$ и два единичных вектора: $OX1$, направленного от точки $O1$ к центру отрезка, соединяющего центры двух сферических пар ВЗ, и $OY1$, расположенного перпендикулярно вектору $OX1$, и лежащего в плоскости ВЗ (рис. 3). В начальном положении векторы $OX1$ и $OY1$ сонаправлены с векторами OX и OY .

Углы поворота ВЗ α, β, γ относительно соответствующих осей OX, OY, OZ учитываются с помощью матриц поворота

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

$$B(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$C(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где $A(\alpha)$, $B(\beta)$ и $C(\gamma)$ — матрица, определяющая угол поворота ВЗ относительно оси OX, OY и OZ соответственно.

Для определения угла поворота ВЗ относительно оси OZ воспользуемся матрицей поворота $C(\gamma)$ и вектором $OX1$:

$$C(g) \times \begin{pmatrix} OX1_1 \\ OX1_2 \\ OX1_3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin g \cdot OX1_2 + \cos g \cdot OX1_1 \\ \cos g \cdot OX1_2 + \sin g \cdot OX1_1 \\ OX1_3 \\ 1 \end{pmatrix},$$

где g — угол поворота, необходимый для возврата ВЗ в начальное положение относительно оси OZ ; $OX1_1$, $OX1_2$, $OX1_3$ — координаты вектора $OX1$.

При отсутствии угла поворота ВЗ относительно оси OZ координата $OX1_2$ равна нулю. Исходя из этого получаем

$$\cos g \cdot OX1_2 + \sin g \cdot OX1_1 = 0.$$

Решая это уравнение, получаем угол g , необходимый для возврата ВЗ в начальное положение относительно оси OZ .

Чтобы найти угол поворота ВЗ относительно оси OY , необходимо определить координаты позиционирующих единичных векторов до поворота относительно оси OZ . Для этого воспользуемся матрицей Денавита — Хартенберга с параметрами $\alpha = 0$, $\beta = 0$, $\gamma = g$, $x = 0$, $y = 0$, $z = 0$:

$$Q = A(\alpha) \cdot B(\beta) \cdot C(\gamma) \cdot D(x, y, z), \quad (2)$$

где Q — матрица перехода; $D(x, y, z)$ — матрица перемещения,

$$D(x, y, z) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Получив новые координаты позиционирующих единичных векторов $OX1$ и $OY1$, находим угол поворота ВЗ относительно оси $O1$.

Определив угол поворота β для возврата в исходное положение относительно оси OY , вычисляем новые координаты позиционирующих единичных векторов $OX1''$ и $OY1''$. Аналогично определяем угол поворота ВЗ относительно оси OX , воспользовавшись матрицей поворота $A(\alpha)$ и вектором $OY1''$.

Определив угол поворота ВЗ α для возврата в исходное положение относительно оси OX , находим новые координаты позиционирующих единичных векторов $OX1'''$ и $OY1'''$.

На данном этапе ВЗ расположено горизонтально, что позволяет легко вычислять координаты трех симметрично расположенных пар

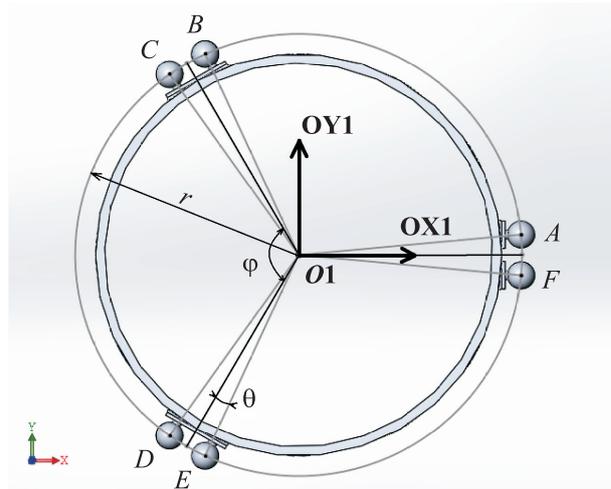


Рис. 3. Схема ВЗ МПС с направляющими, расположенными под углом 45° к плоскости основания

векторов, идущих от центральной точки ВЗ к точкам его крепления (OA' , OB' , OC' , OD' , OE' , OF'), зная угол отклонения вектора $OX1'''$ от точки крепления ВЗ θ , расстояние от центральной точки ВЗ до точек его крепления r , угол между парами симметрично расположенных точек крепления ϕ .

С помощью векторного произведения матрицы перехода Q (с параметрами $-\alpha$, $-\beta$, $-\gamma$, $x = 0$, $y = 0$, $z = 0$) и векторов OA' , OB' , OC' , OD' , OE' , OF' определяем координаты этих векторов в произвольно заданном положении ВЗ: OA , OB , OC , OD , OE , OF . Имея данные векторы, находим координаты точек крепления ВЗ: A , B , C , D , E , F .

Определим смещение линейных приводов в каждой цепи и их координаты:

$$L^2 = (X1 - Xk)^2 + (Y1 - Yk)^2 + (Z1 - Zk)^2, \quad (3)$$

где L — длина промежуточного звена; $X1$, $Y1$, $Z1$ — координаты точки крепления на ВЗ в системе координат основания; Xk , Yk , Zk — координаты текущего положения линейного привода.

В выражении (3)

$$\begin{aligned} Xk &= (X2 + pX3)/(1 + p); \\ Yk &= (Y2 + pY3)/(1 + p); \\ Zk &= (Z2 + pZ3)/(1 + p). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $X2$, $Y2$, $Z2$ и $X3$, $Y3$, $Z3$ — координаты линейного привода на направляющих в нижнем и верхнем крайних положениях соответственно, которое он может занять согласно

конструкции основания; p — отношение длин отрезков, получившихся в результате разделения максимально возможного пути линейного привода (разницы между верхней и нижней крайними точками положения привода) точкой, в которой привод находится при заданном ему смещении,

$$p = \frac{1-q}{q}, \tag{5}$$

где q — отношение пройденного линейным приводом пути к его максимально возможному значению, показывающее, какую часть пути прошел привод по направляющим, $q = 0 \dots 1$.

Решив уравнение (3), найдем его корни q .

Аналогичным образом необходимо провести расчет и для пяти других цепей.

В результате определена зависимость между положением ВЗ и смещением линейных приводов, находящихся на основании, и тем самым решена обратная задача о положениях.

Рассмотрим решение данной задачи на примере цепи AA_k (см. рис. 2). Для решения обратной задачи зададим координаты центральной точки ВЗ $O1$ и два единичных позиционирующих вектора $OX1$ и $OY1$:

$$O1 = \begin{pmatrix} -0,578 \\ 0,328 \\ 2,856 \end{pmatrix}; \quad X1 = \begin{pmatrix} 0,380 \\ 0,534 \\ 3,057 \end{pmatrix}; \quad Y1 = \begin{pmatrix} -0,751 \\ 1,297 \\ 2,684 \end{pmatrix}.$$

Вычислим координаты единичных векторов

$$OX1 = \begin{pmatrix} X1_0 \\ X1_1 \\ X1_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} O_0 \\ O_1 \\ O_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,958 \\ 0,206 \\ 0,201 \end{pmatrix};$$

$$OY1 = \begin{pmatrix} Y1_0 \\ Y1_1 \\ Y1_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} O_0 \\ O_1 \\ O_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,173 \\ 0,969 \\ -0,172 \end{pmatrix}.$$

Определим угол γ с помощью матрицы поворота

$$C(\gamma) \times \begin{pmatrix} OX1_0 \\ OX1_1 \\ OX1_2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,206 \sin \gamma + 0,958 \cos \gamma \\ 0,206 \sin \gamma + 0,958 \cos \gamma \\ 0,201 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

При отсутствии угла поворота относительно оси OZ координата $OX1_2$ равна нулю. Исходя из этого получаем

$$0,206 \sin \gamma + 0,958 \cos \gamma = 0.$$

Решив это уравнение относительно неизвестной, находим угол $\gamma = -12,187^\circ$, необходи-

мый для возврата ВЗ в начальное положение относительно оси OZ . Следовательно, угол поворота ВЗ будет равен $\gamma_1 = 12,187^\circ$.

Определим координаты позиционирующих единичных векторов до поворота относительно оси OZ , для чего воспользуемся матрицей перехода Денавита — Хартенберга (2) с параметрами $\alpha = 0$, $\beta = 0$, $\gamma = -12,187^\circ$, $x = 0$, $y = 0$, $z = 0$:

$$OX1' = Q \times \begin{pmatrix} OX1_0 \\ OX1_1 \\ OX1_2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,98 \\ 0 \\ 0,201 \\ 1 \end{pmatrix};$$

$$OY1' = Q \times \begin{pmatrix} OY1_0 \\ OY1_1 \\ OY1_2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,035 \\ 0,985 \\ -0,172 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Получив новые координаты позиционирующих единичных векторов $OX1'$ и $OY1'$, вычисляем угол поворота ВЗ относительно оси OY , воспользовавшись матрицей поворота $B(\beta)$ и вектором $OX1'$ (в данном случае при отсутствии поворота относительно оси OY координата $OX1'_3 = 0$).

Определив угол поворота ВЗ $\beta = 11,619^\circ$ для возврата в исходное положение относительно оси OY и угол поворота ВЗ $\beta_1 = -11,619^\circ$, находим новые координаты позиционирующих единичных векторов $OX1''$ и $OY1''$ с помощью векторного произведения матрицы перехода Q (с параметрами $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 11,619^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $x = 0$, $y = 0$, $z = 0$) и этих единичных векторов. Аналогично определяем угол поворота ВЗ относительно оси OX , воспользовавшись матрицей поворота $A(\alpha)$ и вектором $OY1''$ (в данном случае при отсутствии поворота относительно оси OX координата $OY1''_3 = 0$).

Определив угол поворота ВЗ $\alpha = 10,094^\circ$ для возврата в исходное положение относительно оси OX и угол поворота ВЗ $\alpha_1 = -10,094^\circ$, находим новые координаты позиционирующих единичных векторов $OX1'''$ и $OY1'''$ с помощью векторного произведения матрицы перехода Q (с параметрами $\alpha = 10,094^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $x = 0$, $y = 0$, $z = 0$) и этих векторов:

$$OX1''' = Q \times \begin{pmatrix} OX1''_0 \\ OX1''_1 \\ OX1''_2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix};$$

$$OY1''' = Q \times \begin{pmatrix} OY1_0'' \\ OY1_1'' \\ OY1_2'' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

На данном этапе ВЗ расположено горизонтально, что позволяет легко определить координаты вектора, идущего от центральной точки ВЗ к точке крепления А,

$$OA' = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & x \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} r \cdot OX1_0'' \\ r \cdot OX1_1'' \\ r \cdot OX1_2'' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,95 \\ 0,18 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

С помощью векторного произведения матрицы перехода Q (с параметрами $\alpha = -10,094^\circ$, $\beta = -10,094^\circ$, $\gamma = -11,619^\circ$, $\delta = 12,187^\circ$, $x = 0$, $y = 0$, $z = 0$) и вектора OA' определяем координаты вектора в произвольно заданном положении ВЗ:

$$OA = Q \times \begin{pmatrix} OA_1' \\ OA_2' \\ OA_3' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,836 \\ 0,578 \\ 0,362 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Имея данный вектор, находим координату точки крепления ВЗ

$$A = \begin{pmatrix} OA_1 \\ OA_2 \\ OA_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} O1_1 \\ O1_2 \\ O1_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,258 \\ 0,905 \\ 3,218 \end{pmatrix}.$$

Определим смещение линейных приводов в каждой цепи и их координаты с помощью выражений (3)–(5) при $L = 2,4$ м; $X1 = A_1$; $Y1 = A_2$; $Z1 = A_3$; $X2 = 1,145$; $Y2 = 1,772$; $Z2 = -0,005$; $X3 = 1,974$; $Y3 = 0,337$; $Z3 = 1,652$.

Упростив и решив уравнение (3), получим его корни

$$q = \begin{cases} -0,921 \\ 0,489 \end{cases}.$$

Возьмем второй корень, так как он подходит под условия ($0 < q < 1$), и с его помощью определим координаты линейного привода по формулам (4):

$$Xk = 1,568; \quad Yk = 1,039; \quad Zk = 0,841.$$

Аналогично проводят вычисления для остальных пяти цепей.

Таким образом, находя смещение линейного привода, а также его координаты при произвольно повернутом ВЗ, решаем обратную задачу о положениях.

Выводы

1. Разработан новый МПС, в котором направляющие линейных приводов расположены на основании под разными углами к его плоскости. Угол наклона можно задать исходя из условий решаемых задач. Благодаря такой структуре созданный механизм можно эффективно использовать при возведении объектов, имеющих цилиндрическую или коническую форму, а также внутри сооружений указанной формы, что позволит применять его при работе под водой или на других планетах.

2. Рассмотрена обратная задача о положениях, важная при анализе и управлении предложенными МПС. Разработан общий подход к ее решению. Приведено ее решение на примере одной кинематической цепи.

3. Дальнейшие исследования связаны с изучением силовых факторов, действующих внутри разработанного МПС, с анализом его динамики и решением задач управления. Также необходимо провести испытания натуральной модели для изучения ее работы.

Литература

- [1] Артоболовский И.И. *Теория механизмов и машин*. Москва, Наука, 1988. 640 с.
- [2] Глазунов В., Колискор А., Крайнев А. *Пространственные механизмы параллельной структуры*. Москва, Наука, 1991. 95 с.
- [3] Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. *Основы управления манипуляционными роботами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 480 с.
- [4] Merlet J.P. *Parallel robots*. Springer, 2006. 402 p.
- [5] Taghirad H. *Parallel robots. Mechanics and control*. CRC Press, Taylor & Francis, 2013. 525 p.
- [6] Siciliano D., Khatib O., eds. *Springer handbook of robotics*. Springer, 2016. 2227 p.

- [7] Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А., Филиппов Г.С. Актуальные проблемы машиноведения и пути их решения. Волновые и аддитивные технологии, станкостроение, роботохирургия. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2018, № 5, с. 16–25.
- [8] Филиппов Г.С., Глазунов В.А. Перспективы применения механизмов параллельной структуры в аддитивных технологиях изготовления центрального тела сопла турбореактивного двигателя, высокопрецизионных хирургических манипуляциях, зондовой диагностике плазменных потоков. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2018, № 3, с. 121–128.
- [9] Nhan N.H.K., Tung V.D., Kheylo S., et al. Oscillations and control of spherical parallel manipulator. *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, 2019, vol. 16, no. 3, doi: <https://doi.org/10.1177%2F1729881419846394>
- [10] Глазунов В.А., Филиппов Г.С., Родионов Ю.В. и др. Тренды развития структурных элементов подводных роботизированных мультиагентных комплексов. *Мат. конф. МТУиП-2020*. Санкт-Петербург, Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020, с. 87–90.
- [11] Fomin A., Glazunov V., Paik J. The design of a new rotary hexapod with a single active degree of freedom. In: *Robotics and mechatronics*. Springer, 2019, pp. 57–65.
- [12] Antonov A., Glazunov V. Position, velocity, and workspace analysis of a novel 6-DOF parallel manipulator with “piercing” rods. *Mech. Mach. Theory*, 2021, vol. 161, art. 104300, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104300>
- [13] Fomin A., Petelin D., Glazunov V. Calculation of drive mechanism for novel rotary hexapod with single motor. In: *Engineer of the XXI Century*. Vol. 70. Springer, 2019, pp. 17–28.
- [14] Fomin A., Antonov A., Glazunov V., et al. Inverse and forward kinematic analysis of a 6-DOF parallel manipulator utilizing a circular guide. *Robotics*, 2021, vol. 10, no. 1, art. 31. DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics10010031>
- [15] Глазунов В.А., Родионов Ю.В., Сплавский И.С. и др. Пространственный механизм с шестью степенями свободы. Патент РФ 202579. Заявл. 17.11. 2020, опублик. 25.02.2021.

References

- [1] Artobolevskiy I.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of machines and mechanisms]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 640 p.
- [2] Glazunov V., Koliskor A., Kraynev A. *Prostranstvennyye mekhanizmy parallel'noy struktury* [Spatial mechanisms of parallel structure]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 95 p.
- [3] Zenkevich S.L., Yushchenko A.S. *Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami* [Fundamentals of manipulation robots control]. Moscow, Bauman Publ., 2004. 480 p.
- [4] Merlet J.P. *Parallel robots*. Springer, 2006. 402 p.
- [5] Taghirad H. *Parallel robots. Mechanics and control*. CRC Press, Taylor & Francis, 2013. 525 p.
- [6] Siciliano B., Khatib O., eds. *Springer handbook of robotics*. Springer, 2016. 2227 p.
- [7] Ganiev R.F., Glazunov V.A., Filippov G.S. Urgent problems of machine science and ways of solving them: wave and additive technologies, the machine tool industry, and robot surgery. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2018, no. 5, pp. 16–25 (in Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2018, vol. 47, no. 5, pp. 399–406, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618818050059>)
- [8] Filippov G.S., Glazunov V.A. Prospects of application of parallel structure mechanisms in additive technologies of manufacturing of the central body of the turbojet engine nozzle, high-precision surgical manipulations, probe diagnostics of plasma flows. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Engineering and Automation Problems], 2018, no. 3, pp. 121–128 (in Russ.).
- [9] Nhan N.H.K., Tung V.D., Kheylo S., et al. Oscillations and control of spherical parallel manipulator. *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, 2019, vol. 16, no. 3, doi: <https://doi.org/10.1177%2F1729881419846394>
- [10] Glazunov V.A., Filippov G.S., Rodionov Yu.V., et al. [Trends of the development of structural elements of underwater robotic multi-agent complexes]. *Mat. конф. МТУиП-2020* [Proc. МТУиП-2020 Conf.]. Sankt-Petersburg, Kontsern «TsNII «Elektropribor» Publ., 2020, pp. 87–90 (in Russ.).
- [11] Fomin A., Glazunov V., Paik J. The design of a new rotary hexapod with a single active degree of freedom. In: *Robotics and mechatronics*. Springer, 2019, pp. 57–65.

- [12] Antonov A., Glazunov V. Position, velocity, and workspace analysis of a novel 6-DOF parallel manipulator with “piercing” rods. *Mech. Mach. Theory*, 2021, vol. 161, art. 104300, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104300>
- [13] Fomin A., Petelin D., Glazunov V. Calculation of drive mechanism for novel rotary hexapod with single motor. In: *Engineer of the XXI Century*. Vol. 70. Springer, 2019, pp. 17–28.
- [14] Fomin A., Antonov A., Glazunov V., et al. Inverse and forward kinematic analysis of a 6-DOF parallel manipulator utilizing a circular guide. *Robotics*, 2021, vol. 10, no. 1, art. 31, doi: <https://doi.org/10.3390/robotics10010031>
- [15] Glazunov V.A., Rodionov Yu.V., Splavskiy I.S., et al. *Prostranstvennyy mekhanizm s shest'yu stepenyami svobody* [6-dof spatial mechanism]. Patent RU 202579. Appl. 17.11. 2020, publ. 25.02.2021.

Статья поступила в редакцию 09.04.2021

Информация об авторах

РОДИОНОВ Юрий Витальевич — заведующий аспирантурой. ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: asp.imash@bk.ru).

СУХОСТАВСКИЙ Александр Николаевич — специалист отдела внедрения систем спутниковой связи, управления разработки телекоммуникационных технологий и проектирования систем и объектов связи. АО «Газпром космические системы» (141108, Шелково, Московская область, Российская Федерация, ул. Московская, д. 77Б, e-mail: suhostavsky180296@gmail.com, alex.suhostavsky@yandex.ru).

РОМАНОВ Андрей Александрович — инженер. ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: dru.ny@mail.ru).

ДУХОВ Андрей Валерьевич — начальник группы. АО «НИИМА «Прогресс» (125183, Москва, Российская Федерация, проезд Черепановых, д. 54, e-mail: dukhov@me.com).

ПЕЛИН Иван Викторович — инженер-программист. ООО «Битроботикс» (109316, Москва, Российская Федерация, Волгоградский пр-т, д. 42, e-mail: ivanpelin1508@yandex.ru).

Information about the authors

RODIONOV Yury Vitalevich — Head of the Post Graduate Department. Federal State Budgetary Institution of Science Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: asp.imash@bk.ru).

SUKHOSTAVSKY Alexander Nikolaevich — specialist of the Department of implementation of satellite communication systems, management of telecommunication technology development and design of systems and communication facilities. JSC «Gazprom space systems» (141108, Shchelkovo town, Moscow region, Russian Federation, Moskovskaya st. 77B, e-mail: suhostavsky180296@gmail.com, alex.suhostavsky@yandex.ru).

ROMANOV Andrey Alexandrovich — Engineer. Federal State Budgetary Institution of Science Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: dru.ny@mail.ru).

DUKHOV Andrey Valerievich — Head of group. JSC Progress MRI (125183, Moscow, Russian Federation, Proyezd Cherepanovykh, Bldg. 54, e-mail: dukhov@me.com).

PELIN Ivan Viktorovich — Programmer engineer. JSC Bitrobotics (109316, Moscow, Russian Federation, Volgogradskiy Prospekt, Bldg. 42, e-mail: ivanpelin1508@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Родионов Ю.В., Сухоставский А.Н., Романов А.А., Духов А.В., Пелин И.В. Разработка и анализ механизма параллельной структуры с линейными приводами, расположенными на основании под разными углами к его плоскости. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 10, с. 41–48, doi: [10.18698/0536-1044-2021-10-41-48](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-10-41-48)

Please cite this article in English as:

Rodionov Y.V., Sukhostavskiy A.N., Romanov A.A., Dukhov A.V., Pelin I.V. Design and Analysis of Parallel Mechanism with Linear Drives Located on the Base at Specified Angles. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 10, pp. 41–48, doi: [10.18698/0536-1044-2021-10-41-48](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-10-41-48)