УДК 531.8, 621.01

Структура и анализ подвижности шестиподвижного манипулятора гибридной структуры с применением винтового исчисления*

А.В. Семенов[1], П.А. Ларюшкин[1,2], А.С. Семенихин[1], А.В. Антонов[2], А.В. Медовщиков[1,2]

[1] МГТУ им. Н.Э. Баумана
[2] Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

Structure and mobility analysis of a 6-DoF hybrid manipulator via screw theory

A.V. Semenov[1], P.A. Laryushkin[1,2], A.S. Semenikhin[1], A.V. Antonov[2], A.V. Medovshchikov[1,2]

[1] Bauman Moscow State Technical University
[2] Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Выполнен синтез конструкции шестиподвижного манипулятора гибридной структуры, где в качестве приводных элементов использованы плоские двухподвижные шарниры. С применением винтового исчисления проанализирована подвижность синтезированного манипулятора, получены аналитические зависимости для определения кинематических и силовых винтов, проверена управляемость движений через анализ взаимных силовых винтов. Результаты работы могут быть использованы для дальнейшего кинематического и статического анализа, а также анализа особых положений манипулятора.

EDN: YIIANH, https://elibrary/yiianh

Ключевые слова: манипулятор гибридной структуры, винтовое исчисление, шестиподвижный манипулятор, анализ подвижности

This paper presents a synthesis and analysis of a new design of a 6-DoF hybrid manipulator. The proposed scheme uses planar 2-DoF joints as actuated elements in the kinematic chains. Using screw theory, we performed a mobility analysis, determined analytical formulas for twists and wrenches, and verified motion controllability through the analysis of reciprocal wrenches. The results of this work can be used for further kinematic and static analysis, as well as for singularity analysis of the manipulator

EDN: YIIANH, https://elibrary/yiianh

Keywords: hybrid manipulator, screw theory, 6-DoF manipulator, mobility analysis

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10304-П, https://rscf.ru/project/22-79-10304-П/.

Развитие робототехнических систем, применяемых в аэрокосмической [1, 2], медицинской [3, 4], машиностроительной [5] и других [6, 7] отраслях промышленности, стимулирует непрерывный поиск и совершенствование конструкций манипуляторов с целью улучшения их характеристик. С точки зрения кинематики их подразделяют на механизмы с последовательной и параллельной структурами. В то время как механизмы с последовательной структурой при схожих габаритных размерах манипулятора позволяют реализовать большую рабочую зону, механизмы с параллельной структурой обладают высокой жесткостью, точностью и повторяемостью.

В качестве недостатков манипуляторов последовательной структуры можно отметить конструктивную сложность их узлов, что обусловлено зависимостью точности позиционирования выходного звена (ВЗ) от точности сборки каждой кинематической цепи. Это накладывает серьезные ограничения на точность изготовления деталей, из которых состоят кинематические цепи. Кроме того, чем дальше от ВЗ находится кинематическая цепь, тем большие нагрузки она воспринимает [8], что предъявляет повышенные требования к нагрузочной способности ее узлов [9]. К недостаткам манипуляторов параллельной структуры можно отнести неоднородность рабочей зоны, выражаемой в зависимости их жесткости от положения ВЗ, а также наличие особых положений, требовательность к точности сборки и сложность последующей калибровки [10].

В настоящее время появляется все больше работ, посвященных разработке так называемых манипуляторов гибридной структуры (МГС), объединяющих достоинства механизмов с последовательной и параллельной структурами [11–13].

Среди манипуляторов, применяемых в промышленности, наиболее универсальными являются шестиподвижные. Их универсальность обусловлена возможностью использовать одну и ту же структурную схему в большом количестве производственных задач благодаря шести управляемым степеням подвижности ВЗ. В манипуляторах параллельной структуры чаще всего для достижения шести степеней подвижности ВЗ к нему присоединяют шесть кинематических цепей [14]. Такое конструктивное решение приводит к ограничению рабочей зоны механизма вследствие возможных столкновений этих цепей друг с другом. Решением этой проблемы может стать сокращение числа кинематических цепей, например до трех. Тогда для унификации каждая из них должна содержать по два приводных шарнира.

Одним из простейших типов движения твердого тела является поступательное с двумя степенями свободы в плоскости. Механизмы, реализующие такой тип движения, будут иметь довольно простую структуру. При этом независимо от структуры механизм можно самостоятельно рассматривать в качестве условного плоского двухподвижного шарнира — кинематической пары четвертого класса.

Основной задачей на начальном этапе разработки любого механизма является структурный синтез подходящих кинематических схем и анализ его подвижности. Существует несколько подходов, позволяющих оценить подвижность механизма и установить, все ли степени свободы являются контролируемыми. Винтовое исчисление — математический аппарат, нашедший широкое применение благодаря возможности не только оценивать количество степеней подвижности, но и проводить статический и кинематический анализ разработанной схемы по полученным зависимостям для определения координат кинематических и силовых винтов [15].

Цель работы — синтез шестиподвижного МГС с плоскими двухподвижными шарнирами и анализ его подвижности с применением винтового исчисления.

Основная часть. Рассмотрим задачу синтеза МГС с шестью степенями свободы ВЗ, где в качестве приводов использованы плоские двухподвижные шарниры.

Двухподвижный плоский шарнир накладывает четыре связи на ВЗ. Отсюда следует, что для обеспечения шести степеней свободы ВЗ кинематическая цепь, соединяющая его с неподвижным основанием, помимо приводного плоского шарнира должна содержать пассивные кинематические пары, позволяющие устранить указанные связи.

Например, такая цепь может содержать одну поступательную пару, ось которой не параллельна плоскости приводного шарнира, а также три вращательные пары с попарно непараллельными осями. Вращательные пары могут быть объединены в один сферический трехподвижный шарнир или реализованы в виде двух

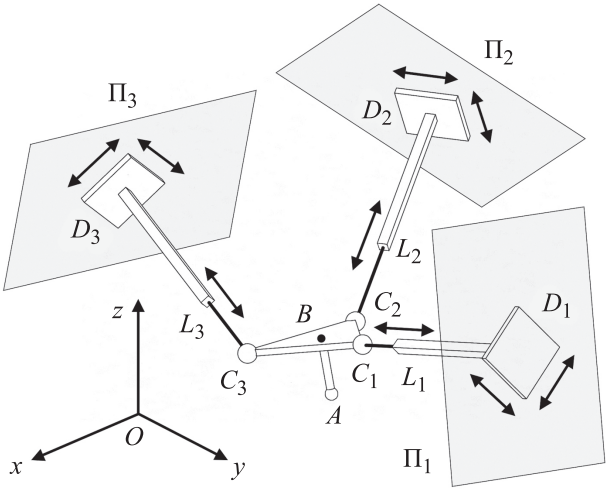


Рис. 1. Структурная схема МГС с приводами в виде плоских двухподвижных шарниров

шарниров — универсального (шарнира Гука) и вращательного. Так как каждая кинематическая цепь с описываемой структурой будет иметь только две активные (приводные) подвижности, количество таких цепей в МГС с шестью управляемыми степенями свободы должно быть равно, как минимум, трем (рис. 1).

Каждая i-я (i = 1, 2, 3) кинематическая цепь рассматриваемого механизма включает в себя плоский двухподвижный шарнир D_i, одноподвижный призматический шарнир L_i, реализованный в виде условных цилиндра со штоком, и трехподвижный сферический шарнир C_i. Предложенное решение можно отнести к МГС, так как плоские приводные шарниры, имеющиеся в каждой из соединенных параллельно кинематических цепей, на практике будут реализованы в виде самостоятельных механизмов последовательной или параллельной структуры. Плоский шарнир D_i позволяет призматическому шарниру L_i двигаться параллельно неподвижной плоскости Π_i. Без потери общности можно считать, что направление перемещения, реализуемого этим шарниром, перпендикулярно указанной плоскости.

Далее при описании положения шарниров в пространстве будем считать, что точка C_i находится в геометрическом центре сферического шарнира, а точка D_i является точкой пересечения плоскости и прямой, ортогональной плоскости Π_i и проходящей через точку C_i.

Кинематические цепи посредством сферических шарниров C_i соединены с подвижной платформой, на которой расположен некоторый условный рабочий орган AB. В соответствии с общепринятыми в теории механизмов параллельной и гибридной структуры обозначениями, здесь и далее при описании структуры рассматриваемой кинематической цепи входящие в нее шарниры будем обозначать как (PP), P и S соответственно. Подчеркивание указывает на то, что шарнир является приводным. Соответственно, структуру рассматриваемого МГС в целом можно обозначить как 3-(PP)PS, где цифра перед дефисом соответствует количеству цепей с указанной после дефиса структурой.

Для определения подвижности исследуемого МГС воспользуемся известной формулой Сомова — Малышева

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

где m — число подвижных звеньев; $p_5 - p_1$ — число кинематических пар пятого–первого класса.

Каждая кинематическая цепь рассматриваемого МГС имеет по одной одноподвижной (пятого класса), одной двухподвижной (четвертого класса) и одной трехподвижной (третьего класса) кинематической паре. Число подвижных звеньев равно семи: ВЗ и по два подвижных звена (условные цилиндр и шток шарнира L_i) в каждой цепи. Подставляя значения этих параметров в выражение (1), получаем

$$W = 6 \cdot 7 - 5 \cdot 3 - 4 \cdot 3 - 3 \cdot 3 - 2 \cdot 0 - 0 = 6.$$

Структурные формулы позволяют оценить только число степеней подвижности МГС, но не описывают их характер. Поэтому дальнейший анализ подвижности МГС будем проводить с использованием винтового исчисления.

Пусть некоторое твердое тело соединено с неподвижным основанием одноподвижным шарниром, ось которого задана трехмерным единичным вектором $\hat{\mathbf{s}}_t$. Тогда мгновенную скорость некоторой точки твердого тела, называемую точкой приведения, и угловую скорость этого тела можно охарактеризовать кинематическим винтом

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} \omega\hat{\mathbf{s}}_t \\ v\hat{\mathbf{s}}_t + \boldsymbol{\rho}_t \times \omega\hat{\mathbf{s}}_t \end{bmatrix},$$

где ω и v — угловая и линейная скорости в шарнире; $\boldsymbol{\rho}_t$ — вектор, проведенный из точки приведения в любую точку на оси шарнира.

Первые три координаты винта называют векторной частью, вторые три — моментной. Если шарнир — вращательный, то v = 0, и $\mathbf{t}$ называют винтом нулевого параметра. Если

шарнир — поступательный, то ω = 0, и **t** называют винтом бесконечного параметра. Если шарнир реализует винтовое перемещение, то отношение v/ω является постоянной (не зависящей от точки приведения) величиной и ее называют параметром винта, а **t** — винтом конечного параметра.

Любой шарнир с подвижностью большей, чем единица, можно представить в виде нескольких одноподвижных шарниров. Так, плоский шарнир эквивалентен двум призматическим шарнирам с непараллельными осями, а сферический шарнир — трем вращательным шарнирам, оси которых пересекаются и не лежат в одной плоскости. Соответственно, шарнирам рассматриваемой кинематической цепи (PP)PS можно сопоставить шесть кинематических винтов: два винта бесконечного параметра $\mathbf{t}_{Di1}$, $\mathbf{t}_{Di2}$ — приводному плоскому шарниру, винт бесконечного параметра $\mathbf{t}_{Li}$ — пассивному призматическому шарниру, три винта нулевого параметра $\mathbf{t}_{Cix}$, $\mathbf{t}_{Ciy}$, $\mathbf{t}_{Ciz}$ — сферическому шарниру (рис. 2).

Для решения многих задач, в том числе оценки подвижности манипулятора и анализа условий попадания в особые положения, выбор точки приведения не имеет значения, так как определяющими факторами служат параметры винтов и взаимное расположение их осей. Однако наиболее логичным представляется выбор точки приведения на ВЗ. При использовании в качестве таковой точки A координаты кинематических винтов i-й цепи будут следующими:

$$\mathbf{t}_{Di1}=\begin{bmatrix}\mathbf{0}_3\\ \hat{\mathbf{s}}_{Di1}\end{bmatrix};\ \mathbf{t}_{Di2}=\begin{bmatrix}\mathbf{0}_3\\ \hat{\mathbf{s}}_{Di2}\end{bmatrix};\ \mathbf{t}_{Li}=\begin{bmatrix}\mathbf{0}_3\\ \hat{\mathbf{s}}_{Li}\end{bmatrix};$$
$$\mathbf{t}_{Cix}=\begin{bmatrix}\hat{\mathbf{s}}_x\\ \boldsymbol{\rho}_{ACi}\times\hat{\mathbf{s}}_x\end{bmatrix};\ \mathbf{t}_{Ciy}=\begin{bmatrix}\hat{\mathbf{s}}_y\\ \boldsymbol{\rho}_{ACi}\times\hat{\mathbf{s}}_y\end{bmatrix};\qquad(2)$$
$$\mathbf{t}_{Ciz}=\begin{bmatrix}\hat{\mathbf{s}}_z\\ \boldsymbol{\rho}_{ACi}\times\hat{\mathbf{s}}_z\end{bmatrix},$$

где $\mathbf{0}_3$ — вектор-столбец из трех нулей, $\mathbf{0}_3=[0\,0\,0]^{\mathrm{T}}$; $\hat{\mathbf{s}}_{Di1}$, $\hat{\mathbf{s}}_{Di2}$ — единичные линейно независимые векторы, параллельные плоскости Π_i; $\hat{\mathbf{s}}_{Li}$ — единичный вектор, направленный вдоль прямой D_iC_i; $\hat{\mathbf{s}}_x$, $\hat{\mathbf{s}}_y$ и $\hat{\mathbf{s}}_z$ — единичные векторы, параллельные осям x, y и z неподвижной системы координат $Oxyz$ соответственно,

$$\hat{\mathbf{s}}_x=[1\,0\,0]^{\mathrm{T}},\ \hat{\mathbf{s}}_y=[0\,1\,0]^{\mathrm{T}};\ \hat{\mathbf{s}}_z=[0\,0\,1]^{\mathrm{T}};$$

$\boldsymbol{\rho}_{ACi}$ — вектор, соединяющий точки A и C_i.

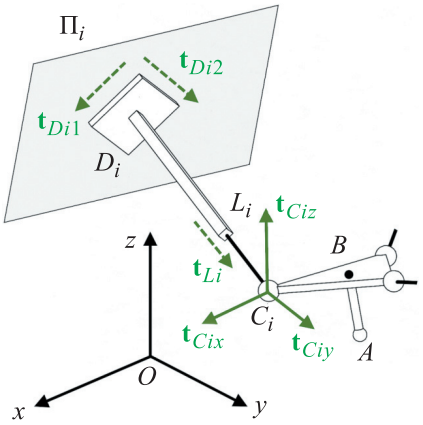


Рис. 2. Схема кинематических винтов цепи (PP)PS

Следует отметить, что направления осей винтов $\mathbf{t}_{Cix}$, $\mathbf{t}_{Ciy}$ и $\mathbf{t}_{Ciz}$ могут быть выбраны произвольным образом при условии, что эти оси, как уже отмечалось, не лежат в одной плоскости. Однако для упрощения изложения принимаем, что они параллельны соответствующим осям системы координат $Oxyz$. Векторы $\hat{\mathbf{s}}_{Di1}$ и $\hat{\mathbf{s}}_{Di2}$ также могут быть выбраны произвольным образом при условии, что они не параллельны друг другу и параллельны плоскости Π_i. Однако их удобно считать перпендикулярными.

Векторы $\boldsymbol{\rho}_{ACi}$ и $\hat{\mathbf{s}}_{Li}$, входящие в состав выражения (2), вычисляем следующим образом:

$$\boldsymbol{\rho}_{ACi}=\begin{bmatrix}x_{Ci}-x_A\\ y_{Ci}-y_A\\ z_{Ci}-y_A\end{bmatrix};$$

$$\hat{\mathbf{s}}_{Li}=\frac{\begin{bmatrix}x_{Ci}-x_{Di} & y_{Ci}-y_{Di} & z_{Ci}-z_{Di}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}}{\sqrt{(x_{Ci}-x_{Di})^2+(y_{Ci}-y_{Di})^2+(z_{Ci}-z_{Di})^2}},$$

где x_{Ci}, y_{Ci}, z_{Ci} и x_{Di}, y_{Di}, z_{Di} — координаты точек C_i и D_i в системе координат $Oxyz$ соответственно; x_A, y_A, z_A — координаты точки A в этой же системе координат; координаты указанных точек определяются при решении задачи о положениях.

Число степеней свободы ВЗ, реализуемое кинематической цепью, равно количеству линейно независимых кинематических винтов шарниров этой цепи. Отсюда следует, что рассматриваемая цепь (PP)PS не накладывает связей на ВЗ и обеспечивает ему шесть степеней свободы только в том случае, если винты $\mathbf{t}_{Di1}$, $\mathbf{t}_{Di2}$, $\mathbf{t}_{Li}$ линейно независимы.

Любой из трех винтов $\mathbf{t}_{Di1}$, $\mathbf{t}_{Di2}$, $\mathbf{t}_{Li}$, как любая их нетривиальная линейная комбинация,

всегда будут линейно независимы с винтами $\mathbf{t}_{Cix}$, $\mathbf{t}_{Ciy}$, $\mathbf{t}_{Ciz}$, поскольку первые три винта имеют бесконечный параметр, а последние три — нулевой.

Из выражения (2) следует, что независимо от выбора коэффициентов линейной комбинации винтов $\mathbf{t}_{Di1}$, $\mathbf{t}_{Di2}$, $\mathbf{t}_{Li}$ ее векторная часть всегда нулевая, в то время как у линейной комбинации винтов $\mathbf{t}_{Cix}$, $\mathbf{t}_{Ciy}$, $\mathbf{t}_{Ciz}$ векторная часть всегда ненулевая, так как векторные части указанных винтов — векторы $\hat{\mathbf{s}}_x$, $\hat{\mathbf{s}}_y$, $\hat{\mathbf{s}}_z$ — взаимно ортогональны. Из их ортогональности также следует, что винты $\mathbf{t}_{Cix}$, $\mathbf{t}_{Ciy}$, $\mathbf{t}_{Ciz}$ всегда остаются линейно независимыми между собой. Поскольку векторы $\hat{\mathbf{s}}_{Di1}$, $\hat{\mathbf{s}}_{Di2}$ и $\hat{\mathbf{s}}_{Li}$ всегда ортогональны, винты $\mathbf{t}_{Di1}$, $\mathbf{t}_{Di2}$ и $\mathbf{t}_{Li}$ также будут линейно независимыми. Таким образом, все шесть винтов шарниров рассматриваемой цепи всегда остаются линейно независимыми, а значит, ВЗ всегда имеет шесть степеней свободы независимо от его положения и ориентации.

Чтобы проверить, будут ли реализуемые степени свободы ВЗ управляемыми, необходимо рассмотреть систему силовых винтов МГС. Подобно тому, как кинематический винт характеризует скорости твердого тела, силовой винт описывает силу, действующую на данное тело вдоль некоторой оси, задаваемой единичным вектором $\hat{\mathbf{s}}_w$, а также момент сил относительно этой оси. В общем случае координаты некоторого силового винта $\mathbf{w}$ имеют вид

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} f\hat{\mathbf{s}}_w \\ m\hat{\mathbf{s}}_w + \boldsymbol{\rho}_w \times f\hat{\mathbf{s}}_w \end{bmatrix},$$

где $\boldsymbol{\rho}_w$ — вектор, проведенный из точки приведения в любую точку на линии действия силы; f и m — численные значения силы и момента.

Для кинематического и силового винтов определена операция относительного момента, представляющая собой сумму скалярных произведений векторной части кинематического винта на моментную часть силового и моментной части кинематического на векторную часть силового:

$$\mathbf{t} \circ \mathbf{w} = \mathbf{w} \circ \mathbf{t} =$$
$$= \omega\hat{\mathbf{s}}_t \cdot \left(m\hat{\mathbf{s}}_w + \boldsymbol{\rho}_w \times f\hat{\mathbf{s}}_w\right) + \left(v\hat{\mathbf{s}}_t + \boldsymbol{\rho}_t \times \omega\hat{\mathbf{s}}\right) \cdot f\hat{\mathbf{s}}_w.$$

Если относительный момент кинематического и силового винтов равен нулю, то такие винты называют взаимными.

В общем случае система силовых винтов механизма включает в себя силовые винты связей, накладываемых цепями, а также приводные силовые винты, характеризующие внешнюю нагрузку, воспринимаемую его приводами. В рассматриваемом МГС эта система будет содержать только приводные силовые винты, так как ни одна цепь не накладывает связей на ВЗ.

Приводной силовой винт кинематической цепи является взаимным всем ее кинематическим винтам за исключением того, который характеризует перемещение в исследуемой приводной паре. Из данного определения следует, что каждой i-й цепи рассматриваемого механизма будут соответствовать два приводных силовых винта $\mathbf{w}_{\text{пр}i1}$ и $\mathbf{w}_{\text{пр}i2}$, которые взаимны всем кинематическим винтам цепи, кроме $\mathbf{t}_{Di1}$ и $\mathbf{t}_{Di2}$:

$$\begin{aligned} &\mathbf{w}_{\text{пр}i1} \circ \mathbf{t} = 0 \quad \forall \mathbf{t} \in \operatorname{span}\left(\mathbf{t}_{Di2}, \mathbf{t}_{Li}, \mathbf{t}_{Cix}, \mathbf{t}_{Ciy}, \mathbf{t}_{Ciz}\right); \\ &\mathbf{w}_{\text{пр}i2} \circ \mathbf{t} = 0 \quad \forall \mathbf{t} \in \operatorname{span}\left(\mathbf{t}_{Di1}, \mathbf{t}_{Li}, \mathbf{t}_{Cix}, \mathbf{t}_{Ciy}, \mathbf{t}_{Ciz}\right). \end{aligned} \tag{3}$$

Для нахождения координат приводных винтов $\mathbf{w}_{\text{пр}i1}$ и $\mathbf{w}_{\text{пр}i2}$ в соответствии с условием (3) изменим точку приведения винтов $\mathbf{t}_{Di1}$, $\mathbf{t}_{Di2}$, $\mathbf{t}_{Li}$, $\mathbf{t}_{Cix}$, $\mathbf{t}_{Ciy}$, $\mathbf{t}_{Ciz}$ с A на C_i:

$$\begin{aligned} &\mathbf{t}_{Di1}^{(Ci)} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 \\ \hat{\mathbf{s}}_{Di1} \end{bmatrix}; \mathbf{t}_{Di2}^{(Ci)} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 \\ \hat{\mathbf{s}}_{Di2} \end{bmatrix}; \mathbf{t}_{Li}^{(Ci)} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 \\ \hat{\mathbf{s}}_{Li} \end{bmatrix}; \\ &\mathbf{t}_{Cix}^{(Ci)} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{s}}_x \\ \mathbf{0}_3 \end{bmatrix}; \mathbf{t}_{Ciy}^{(Ci)} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{s}}_y \\ \mathbf{0}_3 \end{bmatrix}; \mathbf{t}_{Ciz}^{(Ci)} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{s}}_z \\ \mathbf{0}_3 \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{4}$$

Из выражения (4) следует, что при приведении в точку C_i моментная часть винта $\mathbf{w}_{\text{пр}i1}$ должна быть равна нулю, а его векторная часть — перпендикулярна векторам $\hat{\mathbf{s}}_{Di2}$ и $\hat{\mathbf{s}}_{Li}$, т. е. равна вектору $\hat{\mathbf{s}}_{Di1}$. Аналогично, моментная

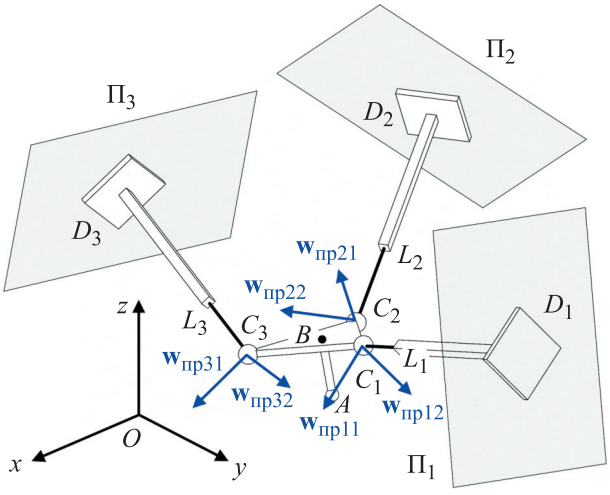


Рис. 3. Схема приводных силовых винтов

часть винта $\mathbf{w}_{\text{пр}i2}$ также будет равна нулю, а векторная — $\hat{\mathbf{s}}_{Di2}$. Отсюда запишем

$$\mathbf{w}_{\text{пр}i1}^{(Ci)} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{s}}_{Di1} \\ \mathbf{0}_3 \end{bmatrix}; \mathbf{w}_{\text{пр}i2}^{(Ci)} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{s}}_{Di2} \\ \mathbf{0}_3 \end{bmatrix}.$$

При приведении данных винтов в точку A получаем

$$\mathbf{w}_{\text{пр}i1} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{s}}_{Di1} \\ \boldsymbol{\rho}_{ACi} \times \hat{\mathbf{s}}_{Di1} \end{bmatrix}; \mathbf{w}_{\text{пр}i2} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{s}}_{Di2} \\ \boldsymbol{\rho}_{ACi} \times \hat{\mathbf{s}}_{Di2} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Таким образом, система силовых винтов будет включать в себя шесть приводных силовых винтов нулевого параметра — по два винта в каждой кинематической цепи (рис. 3), координаты которых будут определяться выражениями (5). В общем случае эта система из шести силовых винтов является невырожденной, а значит, степени свободы ВЗ являются управляемыми.

Выводы

1. Синтезирована схема МГС, где в качестве приводных узлов использованы плоские двухподвижные шарниры.

2. С применением винтового исчисления получены аналитические зависимости для определения кинематических и силовых винтов синтезированного МГС.

3. В дальнейших исследованиях полученные зависимости будут использованы для исследования кинематики, статики, а также особых положений МГС.

Литература

[1] Flores-Abad A., Ma O., Pham K. et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing. *Prog. Aerosp. Sci.*, 2014, vol. 68, pp. 1–26, doi: https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.03.002

[2] He J., Zheng H., Gao F. et al. Dynamics and control of a 7-DOF hybrid manipulator for capturing a non-cooperative target in space. *Mech. Mach. Theory*, 2019, vol. 140, pp. 83–103, doi: https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.05.020

[3] Wang T., Li H., Pu T. et al. Microsurgery robots: applications, design, and development. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 20, art. 8503, doi: https://doi.org/10.3390/s23208503

[4] Peters B.S., Armijo P.R., Krause C. et al. Review of emerging surgical robotic technology. *Surg. Endosc.*, 2018, vol. 32, no. 4, pp. 1636–1655, doi: https://doi.org/10.1007/s00464-018-6079-2

[5] Liu Q., Liu H., Xiao J. et al. Open-architecture of CNC system and mirror milling technology for a 5-axis hybrid robot. *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 2023, vol. 81, art. 102504, doi: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102504

[6] Leveziel M., Laurent G.J., Haouas W. et al. A 4-DoF parallel robot with a built-in gripper for waste sorting. *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 2022, vol. 7, no. 4, pp. 9834–9841, doi: https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3192582

[7] Krut S., Nabat V., Company O. et al. A high-speed parallel robot for SCARA motions. *IEEE ICRA*, 2004, vol. 4, pp. 4109–4115, doi: https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1308914

[8] Briot S., Bonev I.A. Are parallel robots more accurate than serial robots? *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.*, 2007, vol. 31, no. 4, pp. 445–455, doi: https://doi.org/10.1139/tcsme-2007-0032

[9] Захаров М.Н., Синицына Ю.В. *Лекции о деталях машин*. Вологда, Инфра-Инженерия, 2025. 224 с.

[10] Shen H., Yang T., Ma L. Synthesis and structure analysis of kinematic structures of 6-dof parallel robotic mechanisms. *Mech. Mach. Theory*, 2005, vol. 40, no. 10, pp. 1164–1180, doi: https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2004.12.020

[11] Kumar S., Wöhrle H., de Gea Fernández J. et al. A survey on modularity and distributivity in series-parallel hybrid robots. *Mechatronics*, 2020, vol. 68, art. 102367, doi: https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102367

[12] Zhang D.S., Xu Y.D., Yao J.T., Zhao Y.S. Analysis and optimization of a spatial parallel mechanism for a new 5-DOF hybrid serial-parallel manipulator. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2018, vol. 31, art. 54, doi: https://doi.org/10.1186/s10033-018-0251-4

[13] Yeshmukhametov A., Kalimoldayev M., Mamyrbayev O. et al. Design and kinematics of serial/parallel hybrid robot. *IEEE ICCAR*, 2017, pp. 162–165, doi: https://doi.org/10.1109/ICCAR.2017.7942679

[14] Li H., Chen W., Leng C. et al. Design, modeling and manufacture error identification of a new 6-degree-of-freedom (6-DOF) compliant parallel manipulator. *Mech. Sci.*, 2025, vol. 16, no. 1, pp. 143–156, doi: https://doi.org/10.5194/ms-16-143-2025

[15] Ларюшкин П.А., Рашоян Г.В., Эрастова К.Г. Об особенностях применения винтового исчисления для оценки близости к особым положениям механизмов параллельной структуры. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2017, № 4, с. 39–45.

References

[1] Flores-Abad A., Ma O., Pham K. et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing. *Prog. Aerosp. Sci.*, 2014, vol. 68, pp. 1–26, doi: https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.03.002

[2] He J., Zheng H., Gao F. et al. Dynamics and control of a 7-DOF hybrid manipulator for capturing a non-cooperative target in space. *Mech. Mach. Theory*, 2019, vol. 140, pp. 83–103, doi: https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.05.020

[3] Wang T., Li H., Pu T. et al. Microsurgery robots: applications, design, and development. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 20, art. 8503, doi: https://doi.org/10.3390/s23208503

[4] Peters B.S., Armijo P.R., Krause C. et al. Review of emerging surgical robotic technology. *Surg. Endosc.*, 2018, vol. 32, no. 4, pp. 1636–1655, doi: https://doi.org/10.1007/s00464-018-6079-2

[5] Liu Q., Liu H., Xiao J. et al. Open-architecture of CNC system and mirror milling technology for a 5-axis hybrid robot. *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 2023, vol. 81, art. 102504, doi: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102504

[6] Leveziel M., Laurent G.J., Haouas W. et al. A 4-DoF parallel robot with a built-in gripper for waste sorting. *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 2022, vol. 7, no. 4, pp. 9834–9841, doi: https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3192582

[7] Krut S., Nabat V., Company O. et al. A high-speed parallel robot for SCARA motions. *IEEE ICRA*, 2004, vol. 4, pp. 4109–4115, doi: https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1308914

[8] Briot S., Bonev I.A. Are parallel robots more accurate than serial robots? *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.*, 2007, vol. 31, no. 4, pp. 445–455, doi: https://doi.org/10.1139/tcsme-2007-0032

[9] Zakharov M.N., Sinitsyna Yu.V. *Lektsii o detalyakh mashin* [Lectures on machine parts]. Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2025. 224 p. (In Russ.).

[10] Shen H., Yang T., Ma L. Synthesis and structure analysis of kinematic structures of 6-dof parallel robotic mechanisms. *Mech. Mach. Theory*, 2005, vol. 40, no. 10, pp. 1164–1180, doi: https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2004.12.020

[11] Kumar S., Wöhrle H., de Gea Fernández J. et al. A survey on modularity and distributivity in series-parallel hybrid robots. *Mechatronics*, 2020, vol. 68, art. 102367, doi: https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102367

[12] Zhang D.S., Xu Y.D., Yao J.T., Zhao Y.S. Analysis and optimization of a spatial parallel mechanism for a new 5-DOF hybrid serial-parallel manipulator. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2018, vol. 31, art. 54, doi: https://doi.org/10.1186/s10033-018-0251-4

[13] Yeshmukhametov A., Kalimoldayev M., Mamyrbayev O. et al. Design and kinematics of serial/parallel hybrid robot. *IEEE ICCAR*, 2017, pp. 162–165, doi: https://doi.org/10.1109/ICCAR.2017.7942679

[14] Li H., Chen W., Leng C. et al. Design, modeling and manufacture error identification of a new 6-degree-of-freedom (6-DOF) compliant parallel manipulator. *Mech. Sci.*, 2025, vol. 16, no. 1, pp. 143–156, doi: https://doi.org/10.5194/ms-16-143-2025

[15] Laryushkin P.A., Rashoyan G.V., Erastova K.G. On the features of applying the theory of screws to the evaluation of proximity to specific positions of the mechanisms of parallel structure. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2017, no. 4, pp. 39–45. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.,* 2017, vol. 46, no. 4, pp. 349–355, doi: https://doi.org/10.3103/S1052618817040100)

Статья поступила в редакцию 08.02.2026

Информация об авторах

СЕМЕНОВ Александр Вадимович — аспирант кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kokkin@mail.ru).

ЛАРЮШКИН Павел Андреевич — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: pav.and.lar@bmstu.ru); старший научный сотрудник лаборатории теории механизмов и структуры машин. Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4).

СЕМЕНИХИН Артем Сергеевич — аспирант кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: semart@bmstu.ru).

АНТОНОВ Антон Вадимович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории теории механизмов и структуры машин. ИМАШ РАН (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: antonov.av@imash.ru).

МЕДОВЩИКОВ Александр Вадимович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: alexmed@bmstu.ru); старший научный сотрудник лаборатории теории механизмов и структуры машин. Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4).

Information about the authors

SEMENOV Alexander Vadimovich — Postgraduate, Department of Machine Design Principles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kokkin@mail.ru).

LARYUSHKIN Pavel Andreevich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor of Department of Machine Design Principles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: pav.and.lar@gmail.com, pav.and.lar@bmstu.ru); Senior Researcher, Mechanisms Theory and Machines Structure Laboratory. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Pereulok, Bldg. 4).

SEMENIKHIN Artem Sergeevich — Postgraduate, Department of Machine Design Principles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: semart@bmstu.ru).

ANTONOV Anton Vadimovich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher, Mechanisms Theory and Machines Structure Laboratory. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: antonov.av@imash.ru).

MEDOVSHCHIKOV Alexander Vadimovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Machine Design Principles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: alexmed@bmstu.ru); Senior Researcher, Mechanisms Theory and Machines Structure Laboratory. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Pereulok, Bldg. 4).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:
Семенов А.В., Ларюшкин П.А., Семенихин А.С., Антонов А.В., Медовщиков А.В. Структура и анализ подвижности шестиподвижного манипулятора гибридной структуры с применением винтового исчисления. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 11, с. 52–59.

Please cite this article in English as:
Semenov A.V., Laryushkin P.A., Semenikhin A.S., Antonov A.V., Medovshchikov A.V. Structure and mobility analysis of a 6-DoF hybrid manipulator via screw theory. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 11, pp. 52–59.