

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 521.1
МРНТИ 30.51.37

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ И ГЕОМЕТРИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ ВИДА 3-PRRS И 3-PRPS

Ж.Ж. БАЙГУНЧЕКОВ, А.Қ. МУСТАФА, Р.А. КАЙЫРОВ, А.Н. КАСИНОВ

Казахский Национальный университет им. аль-Фараби

Казахский Национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева

Аннотация: Параллельные манипуляторы с шестью степенями свободы и тремя ногами или триподы имеют большую рабочую зону и менее сложные сингулярные конфигурации по сравнению с параллельными манипуляторами с шестью степенями свободы и шестью ногами или гексаподами. В данной работе проведен структурный синтез и исследована геометрия параллельных манипуляторов-триподов вида 3-PRRS и 3-PRPS, где P , R , S – поступательная, вращательная и сферическая кинематические пары соответственно.

Ключевые слова: параллельный манипулятор, гексапод, трипод, геометрия, обратная кинематика, степень свободы, матрица преобразования, подвижная платформа, кинематическая пара

STRUCTURAL SYNTHESIS AND GEOMETRY OF 3-PRRS AND 3-PRPS TYPE PARALLEL MANIPULATORS

Abstract: Parallel manipulators with six degrees of freedom and three limbs or tripods have a large workspace and less complex singular configurations compared to the parallel manipulators with six degrees of freedom and six limbs or hexapods. In this paper, structural synthesis and geometry of 3-PRRS and 3-PRPS tripod type parallel manipulators are considered, where P , R , S are prismatic, revolute and spherical kinematic pairs, respectively.

Keywords: Parallel manipulator, hexapod, tripod, geometry, inverse kinematic, degree of freedom, transformation matrix, mobile platform, kinematic pair

3-PRRS ЖӘНЕ 3-PRPS ЖӘНЕ ТҮРДЕГІ ПАРАЛЛЕЛЬ МАНИПУЛЯТОРДЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ СИНТЕЗІ ЖӘНЕ ГЕОМЕТРИЯСЫ

Аңдатпа: Алты еркіндік дәрежесі және үш аяғы бар немесе трипод параллель манипуляторлар алты еркіндік дәрежесі және алты аяғы бар немесе гексапод параллель манипуляторларға қарағанда үлкен жұмыс алаңы және қарапайым сингулярлық конфигурациясына ие. Берілген мақалада 3-PRRS және 3-PRPS түрдегі трипод параллель манипуляторлардың құрылымдық синтезі жүргізілген және олардың геометриясы қарастырылған, мұнда P , R , S – сәйкестіне ілгерілемелі, айналмалы және сфералық кинематикалық жұптар.

Түйінді сөздер: Параллель манипулятор, гексапод, трипод, геометрия, кері кинематика, еркіндік дәрежесі, түрлендіру матрицасы, қозғалмалы платформа, кинематикалық жұп

Введение

Параллельные манипуляторы по сравнению с серийными манипуляторами имеют большую грузоподъемность и высокую точность позиционирования, обладают большим быстродействием и благоприятными динамическими параметрами [1-3]. Широко известны параллельные манипуляторы вида гексапод с шестью степенями свободы, имеющие шесть ног, построенные на основе платформы Стюарта [4]. Параллельные манипуляторы с тремя ногами или триподы по сравнению с гексаподами имеют большую рабочую зону и

малую металлоемкость. Данная работа посвящена исследованию триподов вида 3-PRRS и 3-PRPS с шестью степенями свободы.

1. Структурный синтез

Согласно разработанному принципу формирования параллельных манипуляторов [5] рассматриваемые параллельные манипуляторы вида 3-PRRS и 3-PRPS сформированы соединением выходного объекта (подвижная платформа) со стойкой (неподвижная платформа) при помощи трех пассивных

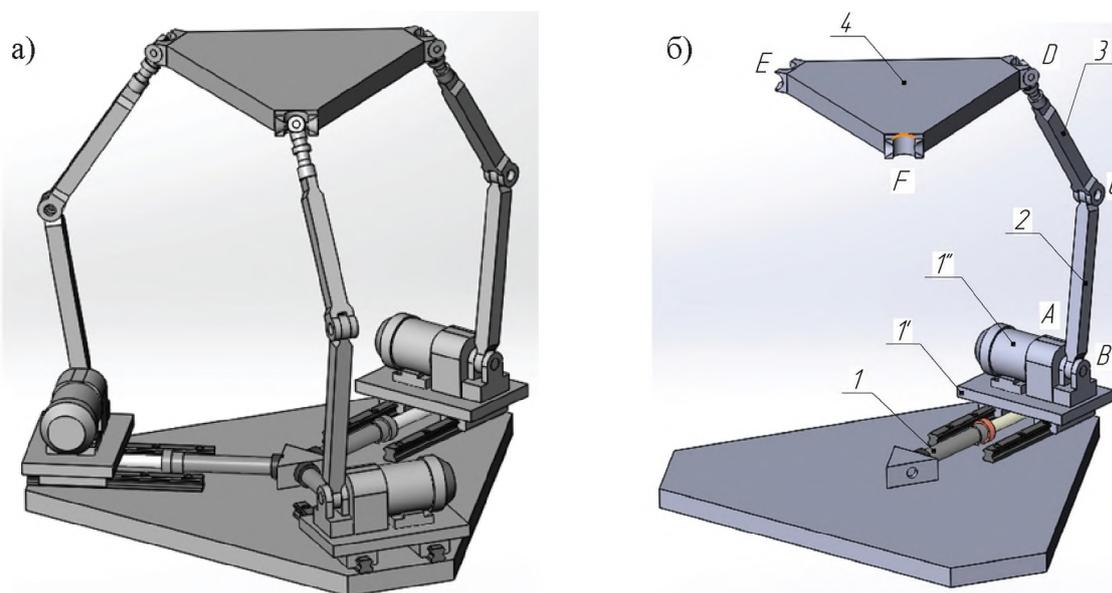


Рис. 1 – 3D-модель параллельного манипулятора вида 3-PRRS

замыкающих кинематических цепей (ЗКЦ) вида PRRS и PRPS. Поскольку пассивные ЗКЦ не накладывают геометрические связи на движение подвижной платформы, то ее шесть степеней свободы сохраняются. Для параллельного манипулятора вида 3-PRRS поступательная и первая вращательная кинематическая пара пассивной ЗКЦ вида PRRS являются входными, для параллельного манипулятора вида 3-PRPS две поступательные кинематические пары являются входными, относительные движения элементов которых определяются решением обратной задачи кинематики.

На рисунке 1а представлена 3D-модель трипода вида 3-PRRS, а на рисунке 1б – одна

из трех его идентичных ног, где поступательные движения трех входных поступательных кинематических пар вдоль направляющих, расположенных под углом $120^{\circ}20'$ на неподвижной платформе 0, выполняются тремя гидроцилиндрами 1, а вращательные движения трех входных вращательных кинематических пар *B* осуществляются тремя сервоприводами $1''1''$, расположенными на каретках $1'1'$, и движущимися вместе со штоком гидроцилиндра. Три сферические кинематические пары *D*, расположенные на подвижной платформе 4, не ограничивают ее движения.

Аналогично на рисунке 2а и 2б представлена 3D-модель трипода вида 3-PRPS и его одной ноги *ABCD*.

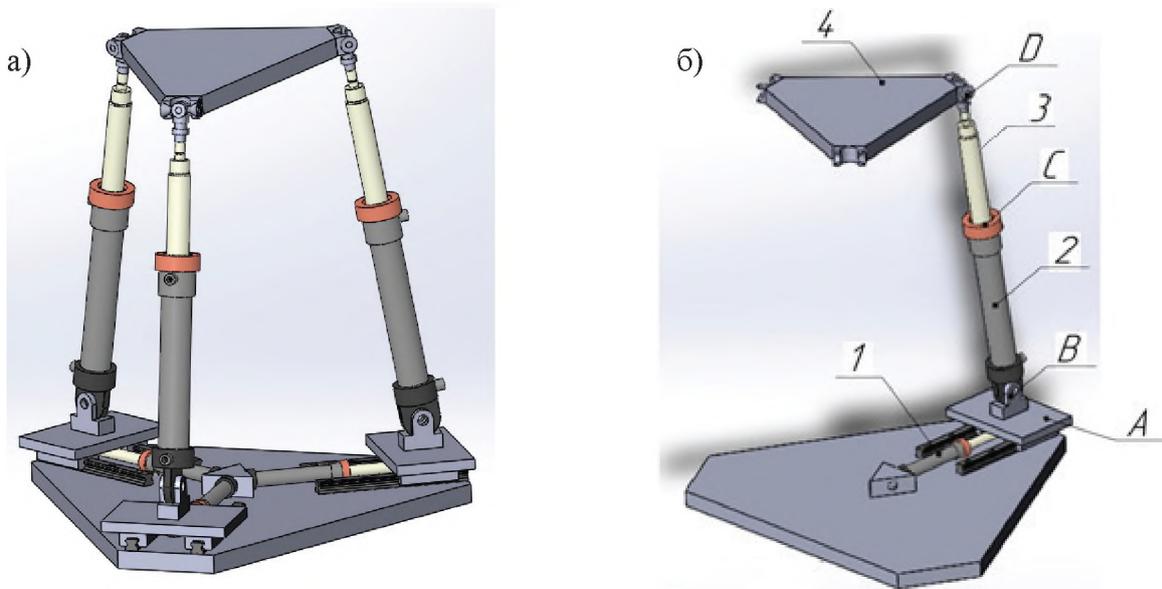


Рис. 2 – 3D-модель параллельного манипулятора вида 3-PRPS

2. Геометрия, постоянные и переменные параметры

Для описания геометрии и исследования кинематики и динамики рассматриваемых параллельных манипуляторов к каждому элементу кинематических пар жестко соединяются системы координат UVW и XYZ , у которых оси W и Z направлены по осям вращательного или поступательного движений элементов кинематических пар, а направления осей U и X совпадают с направлением общего перпендикуляра между осями W и Z , расположенными на концах бинарного звена.

Матрица преобразования между системами координат $U_j V_j W_j$ и $X_k Y_k Z_k$ (рис.3) имеет вид

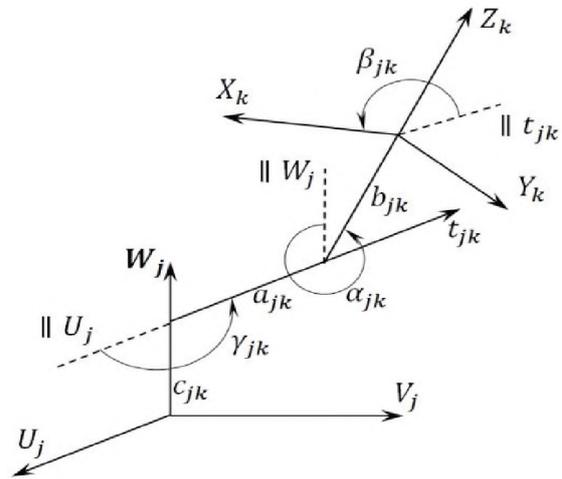


Рис. 3. Системы координат $U_j V_j W_j$ и $X_k Y_k Z_k$

где a_{jk} – расстояние между осями W_j и Z_k , измеренное по направлению общего перпендику-

$$T_{jk} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_{jk} \cdot c\gamma_{jk} + & c\gamma_{jk} \cdot c\beta_{jk} - & -c\gamma_{jk} \cdot s\beta_{jk} - & \\ +b_{jk} \cdot s\gamma_{jk} \cdot s\alpha_{jk} & -s\gamma_{jk} \cdot c\alpha_{jk} \cdot s\beta_{jk} & -s\gamma_{jk} \cdot c\alpha_{jk} \cdot c\beta_{jk} & s\gamma_{jk} \cdot s\alpha_{jk} \\ a_{jk} \cdot s\gamma_{jk} - & s\gamma_{jk} \cdot c\beta_{jk} + & c\gamma_{jk} \cdot c\alpha_{jk} \cdot c\beta_{jk} - & \\ -b_{jk} \cdot c\gamma_{jk} \cdot s\alpha_{jk} & c\gamma_{jk} \cdot c\alpha_{jk} \cdot s\beta_{jk} & -s\gamma_{jk} \cdot s\beta_{jk} & -c\gamma_{jk} \cdot s\alpha_{jk} \\ c_{jk} + b_{jk} \cdot c\alpha_{jk} & s\alpha_{jk} \cdot s\beta_{jk} & s\alpha_{jk} \cdot c\beta_{jk} & c\alpha_{jk} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

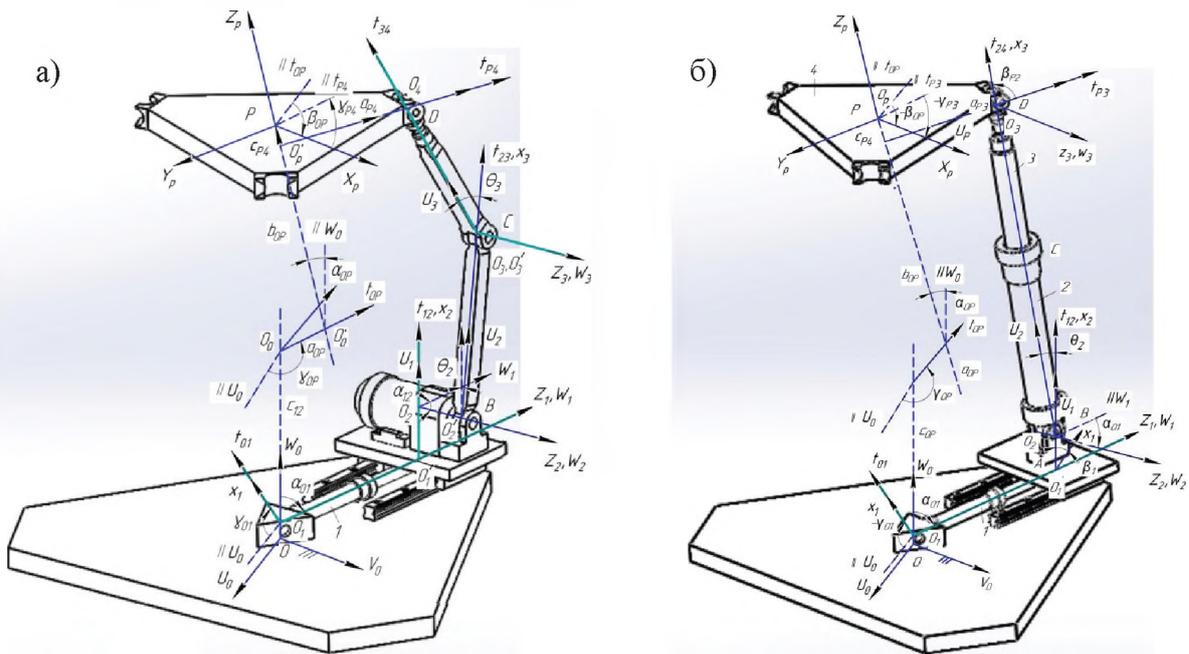


Рис. 4 – Параметры ног параллельных манипуляторов вида 3-PRRS и 3-PRPS

ляра t_{jk} между этими осями; α_{jk} – угол между положительными направлениями осей W_j и Z_k , измеренный против хода часовой стрелки вокруг положительного направления t_{jk} ; b_{jk} – расстояние от направления t_{jk} до направления оси X_k , измеренное по положительному направлению оси Z_k ; β_{jk} – угол между положительными направлениями t_{jk} по оси X_k , измеренный против хода часовой стрелки вокруг положительного направления оси Z_k ; n_{jk} – расстояние от положительного направления оси U_j до направления t_{jk} , измеренное по положительному направлению оси W_j ; γ_{jk} – угол между положительными направлениями оси U_j и t_{jk} , измеренный против хода часовой стрелки вокруг положительного направления оси W_j .

На основе матрицы \mathbf{T}_{jk} составляются матрицы бинарных звеньев и кинематических пар. Матрица преобразования \mathbf{G}_{jk} между системами координат $U_jV_jW_j$ и $X_kY_kZ_k$, жестко соединенных на концах бинарного звена, называется матрицей бинарного звена. Матрица бинарного звена \mathbf{G}_{jk} содержит постоянные

параметры, характеризующие геометрию бинарного звена. Матрица преобразования \mathbf{P}_j между системами координат $U_jV_jW_j$ и $X_jY_jZ_j$, жестко соединенных с элементами j -ой кинематической пары, называется матрицей кинематических пар, которая содержит переменные параметры, характеризующие относительные движения элементов кинематических пар.

С неподвижной платформой рассматриваемых параллельных манипуляторов соединяем абсолютную систему координат $OU_0V_0W_0$, а с подвижной платформой – систему координат $PX_PY_PZ_P$, где начала этих систем координат расположены в геометрических центрах неподвижной и подвижной платформ, а оси W_0 и Z_P направлены перпендикулярно к их плоскостям.

С каждым элементом кинематических пар жестко соединяем системы координат $U_jV_jW_j$ и $X_kY_kZ_k$, где $i, j = 1, 2, 3, 4$. Здесь кинематические пары A, B, C, D обозначены цифрами 1, 2, 3, 4 соответственно. Как видно из рисунка 4а матрицы кинематических пар и бинарных звеньев для ноги параллельного манипулятора вида 3-PRRS имеют следующие элементы: $\mathbf{G}_{01} = \mathbf{G}_{01}(0, \alpha_{01}, 0, 0, c_{01}, \gamma_{01})$.

$\mathbf{P}_1^P = \mathbf{P}_1^P(0, 0, 0, 0, c_{11}, 0)$, $\mathbf{P}_2^R = \mathbf{P}_2^R(0, 0, 0, \beta_{22}, 0, 0)$,
 $\mathbf{G}_{12} = \mathbf{T}_{12}(a_{12}, \alpha_{12}, b_{12}, \beta_{12}, 0, 0)$, $\mathbf{G}_{23} = \mathbf{G}_{23}(a_{23}, 0, 0, 0, 0, 0)$,
 $\mathbf{P}_3^R = \mathbf{P}_3^R(0, 0, 0, \beta_{33}, 0, 0)$, $\mathbf{G}_{34} = \mathbf{G}_{34}(a_{34}, 0, 0, 0, 0, 0)$,
 где $\alpha_{01} = 90^0$, $c_{01} = OO_1$, $c_{11} = O_1O_1' = s_1$, $a_{12} = O_1'O_2$,
 $\alpha_{12} = -90^0$, $b_{12} = O_2O_2'$, $\beta_{12} = 90^0$, $\beta_{22} = \theta_2$,
 $a_{23} = O_2O_3$, $\beta_{33} = \theta_3$, $a_{34} = O_3O_4$. Из этих параметров
 параметры $\alpha_{01}, c_{01}, \gamma_{01}, a_{12}, \beta_{12}, a_{23}, a_{34}$ являются постоянными, которые характеризуют
 геометрию звеньев, а параметры $c_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$ являются переменными, которые характери-
 зуют относительные движения элементов кинематических пар. Из этих переменных пара-
 метров параметры $a_{11} = s_1$ и $\beta_{22} = \theta_2$ являются входными, а параметры $\beta_{33} = \theta_3$ является вы-
 ходными.

Матрицы кинематических пар и бинарных звеньев для ноги параллельного манипулятора вида 3-PRPS (рис.3б) имеют следующие элементы: $\mathbf{G}_{01} = \mathbf{G}_{01}(0, \alpha_{01}, 0, 0, c_{01}, \gamma_{01})$,
 $\mathbf{P}_1^P = \mathbf{P}_1^P(0, 0, 0, 0, c_{11}, 0)$, $\mathbf{G}_{12} = \mathbf{T}_{12}(a_{12}, \alpha_{12}, 0, 0, 0, 0)$,
 $\mathbf{P}_2^R = \mathbf{P}_2^R(0, 0, 0, 0, 0, \gamma_{22})$, $\mathbf{P}_3^P = \mathbf{P}_3^P(a_{23}, 0, 0, 0, 0, 0)$,
 где $\alpha_{01} = 90^0$, $c_{01} = OO_1$, $c_{11} = O_1O_1' = s_1$, $a_{12} = O_1'O_2$, $\alpha_{12} = -90^0$, $a_{23} = O_2O_3 = s_3$. Из этих параметров параметры $\alpha_{01}, c_{01}, \gamma_{01}, a_{12}, \beta_{12}$ являются посто-

янными, которые характеризуют геометрию звеньев, а параметры $c_{11}, a_{23}, \gamma_{22}$ являются переменными, которые характеризуют относительные движения элементов кинематических пар. Из этих переменных параметров параметры $c_{11} = s_1$, $a_{23} = s_3$ являются входными, а параметр $\gamma_{22} = \theta_2$ является выходным.

Остальные две ноги рассматриваемых параллельных манипуляторов имеют аналогичные параметры.

Выводы

Параллельные манипуляторы вида 3-PRRS и 3-PRPS сформированы соединением подвижной платформы со стойкой (неподвижной платформой) при помощи трех пассивных ЗКЦ вида PRRS и PRPS. Эти пассивные ЗКЦ не накладывают геометрические связи на движение подвижной платформы и ее шесть степеней свободы сохраняются. Для описания геометрии к каждому элементу кинематических пар жестко соединены правые декартовы системы координат. На основе матриц преобразования этих систем координат формируются матрицы бинарных звеньев и кинематических пар, определяются постоянные и переменные параметры исследуемых параллельных манипуляторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Merlet J-P. Parallel Robots. Kluwer, Dordrecht, 2000.
2. Tsai L.W. Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. John Wiley & Sons, New York, 1999.
3. Ceccarelli M. Fundamentals of Mechanics of Robotic Manipulation. Kluwer Academic Publisher, 2004.
4. Stewart D. A Platform with six Degrees-of-Freedom. Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 108, No. 15, 1965, pp.3771-386.
5. Baigunchekov Zh., et. al. Geometry and Direct Kinematics of Six-DoF Three-Limbed Parallel Manipulator. ROMANSY21-Robot Design, Dynamics and Control, Springer, 2016, pp.39-46.