

Н. С. Воробьева, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой, vgsxa@mail.ru,
Волгоградский государственный аграрный университет, г. Волгоград,

В. В. Жога, д-р физ.-мат. наук, проф., проф., viczhoga@gmail.com,

Л. В. Жога, д-р физ.-мат. наук, доц., проф., levjog@mail.ru,

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград,

Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, "Университет Иннополис",

г. Иннополис, Татарстан

Динамический синтез алгоритмов управления манипулятором параллельно-последовательной структуры¹

Обсуждается разработка алгоритма динамического синтеза управляющих сигналов исполнительных приводов, обеспечивающих реализацию требуемых траекторий и законов движения рабочего органа манипулятора. Рассматривается манипулятор параллельно-последовательной структуры (гибридный), состоящий из манипулятора трипода, установленного на поворотном основании и манипулятора последовательной структуры с тремя управляемыми степенями свободы. Перемещение рабочего органа из известного положения в заданное конечное положение реализуется изменением длин исполнительных звеньев трипода и изменением углов поворота звеньев манипулятора последовательной структуры. В качестве математической модели управляемых движений манипулятора рассматриваются нелинейные уравнения динамики, полученные с помощью уравнений Лагранжа с неопределенными множителями с дополнительными голономными связями. Перемещения манипулятора определяются характером выполняемой технологической операции. В статье решена задача осуществления программных траекторий рабочего органа, заданных в параметрической форме. Сначала определяются законы изменения обобщенных координат манипулятора, удовлетворяющие заданным граничным условиям. С этой целью программные законы перемещения рабочего органа представляются в дискретной форме, и определяется множество точек, характеризующих последовательные положения исполнительных приводов трипода, путем решения оптимизационной задачи о конфигурации манипулятора (позиционная задача) из условия минимума изменения длин исполнительных звеньев в каждой точке траектории рабочего органа. Затем проводится интерполяция этих значений либо конечным набором сплайнов третьего и четвертого порядка, либо для первого и последнего участков траектории сплайнами пятого порядка и методом точечной квадратичной аппроксимации — для промежуточных участков траектории. Методика синтеза динамических алгоритмов стабилизации рабочего органа относительно заданного положения и реализации программных траекторий основана на формировании управляющих сигналов исполнительных приводов путем решения обратной задачи динамики с использованием алгоритма формирования управляющих сигналов из условия, чтобы отклонения от текущих значений программных траекторий были решениями дифференциального уравнения второго порядка. Контуры управления исполнительными двигателями синтезируются в процессе построения алгоритма траекторного управления. Приводятся результаты численного моделирования, подтверждающие работоспособность предложенного алгоритма на примере поступательного перемещения рабочего органа.

Ключевые слова: манипулятор параллельно-последовательной структуры (гибридный), программные траектории, алгоритмы синтеза программных управляющих сигналов

Введение

Манипуляторы с механизмами параллельно-последовательной структуры находят все большее применение в различных отраслях промышленности: в машиностроении при механической обработке деталей сложной геометрии [1–3], в приборостроении при измерении отклонений позиционирования [4], при упаковке продукции [5], а также в технологических процессах при производстве и переработке сельскохозяйственной продукции [6]. К наиболее важным задачам при разработке таких манипуляторов относятся

кинематический и динамический анализ, разработка методов синтеза перемещений рабочего органа в пространстве с требованием устойчивости заданных параметров при наличии начальных возмущений, координация движений приводных исполнительных механизмов. На вход системы управления должны поступать управляющие сигналы, формирующие программные законы перемещения исполнительных приводов манипулятора. На выходе — заданные обобщенные координаты и скорости рабочего органа. Необходимо синтезировать оптимальные программные законы управления движением исполнительных приводов, учитывающие характеристики приводных двигателей, их влияние на динамику управляемых механизмов.

¹Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-48-340013 p_a.

Постановка задачи

Рассматривается манипулятор параллельно-последовательной структуры (рис. 1) с семью управляемыми степенями свободы. Жесткость конструкции обеспечивает пирамида, составленная из трех активных звеньев переменной длины AM , BM , CM , а дополнительную маневренность и манипулятивность — исполнительное звено AD и захват последовательной структуры с тремя управляемыми степенями свободы [7] (рис. 2, см. четвертую сторону обложки).

Пространственное положение манипулятора и рабочего органа захвата определяются относительно абсолютной системы координат $Oxyz$. С корпусом каждого исполнительного звена захватного устройства (рис. 2) связаны подвижные системы координат $O_1x_1y_1z_1$, $O_2x_2y_2z_2$, $O_3x_3y_3z_3$. Ось $O_i z_i$ каждого звена направлена по оси вращения этого звена относительно предыдущего звена.

Конструкция манипулятора обеспечивает голономные связи между координатами точки $M[x_M(t), y_M(t), z_M(t)]$ — центра масс сферического шарнира — и длинами исполнительных звеньев [8]:

$$\begin{aligned} l_1(t) &= \sqrt{x_M^2 + (y_M + |OA|\sin\varphi)^2 + (z_M - |OA|\cos\varphi)^2}; \\ l_2(t) &= \sqrt{(x_M - |OB|)^2 + y_M^2 + z_M^2}; \\ l_3(t) &= \sqrt{(x_M + |OB|)^2 + y_M^2 + z_M^2}; \\ l_4(t) &= \sqrt{(|OK| - |OA|\sin\varphi)^2 + (|OA|\cos\varphi + |DK|)^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Для реализации технологических процессов при механической обработке, сварке, упаковке и т.п. [1, 3] необходимо перемещать рабочий орган манипулятора по заданной программной траектории, сохраняя заданное пространственное положение рабочего органа. Определение аналитических выражений для законов изменения длин исполнительных цилиндров $l_k(t)$, ($k = 1, \dots, 4$) и законов изменения углов $\varphi(t)$, $\alpha(t)$, $\psi(t)$, $\beta(t)$ основывается на дискретизации траектории $x_E(t)$, $y_E(t)$, $z_E(t)$ характерной точки рабочего органа манипулятора (см. рис. 1) и законов изменения углов $\alpha(t)$, $\psi(t)$, $\beta(t)$ в моменты времени $t_i = i\Delta t$, $i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$. Множество значений $l_k(t_i)$, ($k = 1, \dots, 4$), характеризующих последовательные положения исполнительных приводов, определяется решением оптимизационной задачи о конфигурации манипулятора [9]. Затем проводится интерполяция этих значений

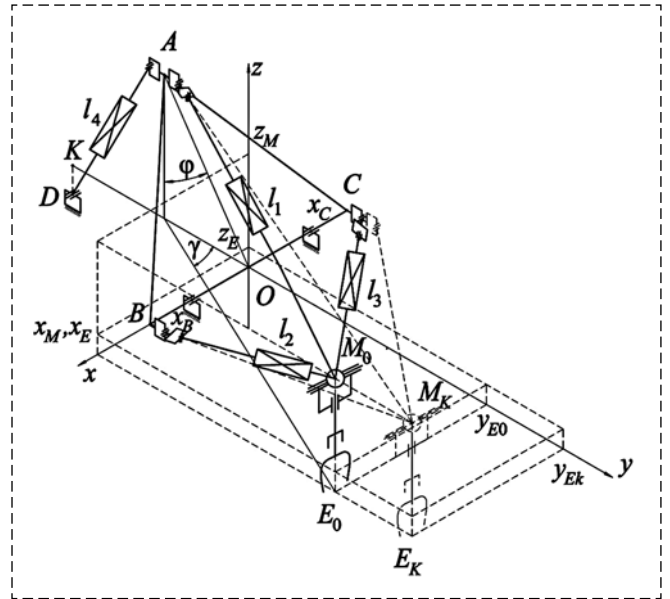


Рис. 1. Расчетная схема манипулятора-трипода на поворотном основании с трехступенным захватным устройством

Fig. 1. The design scheme of the manipulator-tripod on a rotating base with a three-stage gripper

либо конечным набором сплайнов третьего и четвертого порядка [10], либо для первого и последнего участков траектории сплайнами пятого порядка и методом точечной квадратичной аппроксимации — для промежуточных участков траектории [11]. Таким образом, находятся полиномы, выражающие обобщенные координаты как функции времени.

В статье приводится решение задачи синтеза алгоритма управления манипулятора, обеспечивающего перемещение рабочего органа в заданное положение за заданное время по программной траектории. Для решения этой задачи используется математическая модель динамики манипулятора.

Полная модель динамики манипулятора

В качестве обобщенных координат принимаются параметры (см. рис. 1) $q_1 = \varphi$, $q_2 = \gamma$, $q_3 = x_M$, $q_4 = y_M$, $q_5 = z_M$, которые описывают конфигурацию манипулятора — трипода с поворотным основанием. Координаты (рис. 2, см. четвертую сторону обложки) $q_6 = \alpha$, $q_7 = \psi$, $q_8 = \beta$ описывают состояние трехзвенного захватного устройства. Угол $\beta(t)$ не влияет на пространственное положение рабочего органа. Закон его изменения определяется характером технологического процесса.

Конструкция сферического узла, в котором сходятся звенья переменной длины $|AM|$, $|BM|$,

$|CM|$, обеспечивает геометрическую связь между координатами $q_1, \dots, q_4$ (см. рис. 1):

$$f(\gamma, \varphi) = \gamma - \arctg \frac{-x_M}{y_M + |OA| \sin \varphi} = 0. \quad (2)$$

Число независимых обобщенных координат манипулятора равно семи.

В качестве исполнительных звеньев используются приводные механизмы, состоящие из двигателя постоянного тока, необратимого редуктора и шариковинтовой передачи. Статическая характеристика привода с двигателем по-

стоянного тока с независимым возбуждением имеет вид

$$F_k = ru_k - sl_k, \quad (3)$$

где F_k — усилие на штоке исполнительного звена; r, s — коэффициенты, зависящие от параметров двигателя и механической передачи; u_k — управляющее напряжение; $\dot{l}_k$ — скорость штока исполнительного звена.

Характеристики приводов поворота звеньев захватного устройства имеют такую же форму.

Выражение кинетической энергии [12] через обобщенные координаты и скорости имеет вид

$$\begin{aligned} T = & \frac{1}{2} m_A |OA|^2 \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} (\dot{x}_M^2 + \dot{y}_M^2 + \dot{z}_M^2) (M + m_W) + \frac{1}{2} I_\gamma \dot{\gamma}^2 + \frac{1}{2} I_\alpha \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} I_\psi \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} I_\beta \dot{\beta}^2 + \\ & + \sin \psi (\dot{x}_m \sin \gamma - \dot{y}_m \cos \gamma) [m_3 l_{c3} + m_4 l_{c4} + m_W l_{cW}] \dot{\gamma} - \cos \alpha (\dot{x}_m \cos \gamma + \dot{y}_m \sin \gamma) \times \\ & \times [m_2 l_{c2} + m_3 (a + l_{c3} \cos \psi) + m_4 (a + l_{c4} \cos \psi) + m_W (a + l_{cW} \cos \psi)] \dot{\gamma} + [m_2 l_{c2} + m_3 (a + l_{c3} \cos \psi) + \\ & + m_4 (a + l_{c4} \cos \psi) + m_W (a + l_{cW} \cos \psi)] [\dot{z}_m \cos \alpha + \sin \alpha (\dot{x}_m \sin \gamma - \dot{y}_m \cos \gamma)] \dot{\alpha} + \\ & + (m_3 l_{c3} + m_4 l_{c4} + m_W l_{cW}) [\sin \psi \cos \alpha (\dot{x}_m \sin \gamma - \dot{y}_m \cos \gamma) - \cos \psi (\dot{x}_m \cos \gamma + \dot{y}_m \sin \gamma) - \\ & - \dot{z}_m \sin \psi \sin \alpha] \dot{\psi} + m_3 l_{c3} (a + l_{c3} \cos \psi) \sin \alpha \sin \psi \dot{\alpha} \dot{\gamma} + (I_{3x} - I_{3y}) \sin \psi \cos \psi \sin \alpha \dot{\alpha} \dot{\gamma} + \\ & + m_4 l_{c4} (a + l_{c4} \cos \psi) \sin \alpha \sin \psi \dot{\alpha} \dot{\gamma} + [(I_{4y} - I_{4x}) \sin \beta \cos \psi \cos \beta \cos \alpha - I_{4z} \sin \psi \sin \alpha] \dot{\gamma} \dot{\alpha} + \\ & + m_W l_{cW} (a + l_{cW} \cos \psi) \sin \alpha \sin \psi \dot{\alpha} \dot{\gamma} + [(I_{Wy} - I_{Wx}) \sin \beta \cos \psi \cos \beta \cos \alpha - I_{Wz} \sin \psi \sin \alpha] \dot{\gamma} \dot{\alpha} + \\ & + m_3 l_{c3} \cos \alpha [l_{c3} \sin^2 \psi + (a + l_{c3} \cos \psi) \cos \psi] \dot{\gamma} \dot{\psi} + I_{3z} \cos \alpha \dot{\gamma} \dot{\psi} + m_4 l_{c4} \cos \alpha [l_{c4} \sin^2 \psi + \\ & + (a + l_{c4} \cos \psi) \cos \psi] \dot{\gamma} \dot{\psi} + (I_{4x} \cos^2 \beta + I_{4y} \sin^2 \beta) \cos \alpha \dot{\psi} \dot{\gamma} + m_W l_{cW} \cos \alpha [l_{cW} \sin^2 \psi + \\ & + (a + l_{cW} \cos \psi) \cos \psi] \dot{\gamma} \dot{\psi} + (I_{Wx} \cos^2 \beta + I_{Wy} \sin^2 \beta) \cos \alpha \dot{\psi} \dot{\gamma} + (I_{4y} - I_{4x}) \sin \beta \cos \beta \cos \psi \dot{\alpha} \dot{\psi} + \\ & + (I_{Wy} - I_{Wx}) \sin \beta \cos \beta \cos \psi \dot{\alpha} \dot{\psi} + I_{4z} (\sin \alpha \dot{\gamma} - \sin \psi \dot{\alpha}) \dot{\beta} + I_{Wz} (\sin \alpha \dot{\gamma} - \sin \psi \dot{\alpha}) \dot{\beta}, \end{aligned} \quad (4)$$

где m_A — приведенная масса поворотного основания ABC ; m_1 — масса пятиподвижного сферического шарнирного узла; m_2, m_3, m_4 — массы звеньев захвата ME ; m_W — масса переносимого груза; $M = m_1, m_2, m_3, m_4$ — приведенная масса манипулятора; l_{c3}, l_{c4}, l_{cW} — расстояния до центров масс звеньев захвата ME и груза; $I_{4y}, I_{4x}, I_{Wy}, I_{Wx}$ — приведенные к осям относительного вращения моменты инерции звеньев 3 и 4 захвата ME и переносимого груза относительно собственных координатных осей.

Приведенные моменты инерции можно записать в виде

$$\begin{aligned} I_\alpha = & I_{2z} + m_2 l_{c2}^2 + m_3 (a + l_{c3} \cos \psi)^2 + \\ & + m_4 (a + l_{c4} \cos \psi)^2 + m_W (a + l_{cW} \cos \psi)^2 + \\ & + (I_{3y} + I_{4z} + I_{Wz}) \sin^2 \psi + [I_{3x} + (I_{4x} + I_{Wx}) \sin^2 \beta + \\ & + (I_{4y} + I_{Wy}) \cos^2 \beta] \cos^2 \psi; \end{aligned}$$

$$I_\beta = I_{4z} + I_{Wz} = \text{const};$$

$$\begin{aligned} I_\gamma = & (m_3 l_{c3}^2 + m_4 l_{c4}^2 + m_W l_{cW}^2) \sin^2 \psi + I_{1z} + \\ & + (I_{2x} + I_{3x} \sin^2 \psi + I_{3y} \cos^2 \psi + \\ & + I_{4z} + I_{Wz}) \sin^2 \alpha + [I_{2y} + I_{3z} + m_2 l_{c2}^2 + \\ & + m_3 (a + l_{c3} \cos \psi)^2 + m_4 (a + l_{c4} \cos \psi)^2 + \\ & + m_W (a + l_{cW} \cos \psi)^2 + (I_{4x} + I_{Wx}) \cos^2 \beta + \\ & + (I_{4y} + I_{Wy}) \sin^2 \beta] \cos^2 \alpha; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_\psi = & I_{3z} + m_3 l_{c3}^2 + m_4 l_{c4}^2 + m_W l_{cW}^2 + \\ & + (I_{4x} + I_{Wx}) \cos^2 \beta + (I_{4y} + I_{Wy}) \sin^2 \beta. \end{aligned} \quad (5)$$

Потенциальная энергия [12] находится по формуле

$$\begin{aligned} \Pi(q_k) = & m_A g |OA| \cos \varphi + (M + m_W) g z_M + \\ & + [m_2 l_{c2} + (m_3 + m_4 + m_W) a + \\ & + (m_3 l_{c3} + m_4 l_{c4} + m_W l_{cW}) \cos \psi] g \sin \alpha. \end{aligned} \quad (6)$$

Смысл геометрических параметров, входящих в выражения (3)—(5) ясен из рис. 1 и рис. 2 (см. четвертую сторону обложки).

Для описания динамики манипулятора воспользуемся уравнениями Лагранжа с неопределенными множителями с дополнительными голономными связями [13, 14]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j - \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} + \lambda \frac{\partial f}{\partial q_j}, \quad (7)$$

$$j = 1, \dots, 8,$$

где T — кинетическая энергия манипулятора; Q_j — обобщенная сила, соответствующая j -й координате; λ — множители Лагранжа; $-\partial \Pi / \partial q_j$ — обобщенная сила потенциальных сил, соответствующая j -й координате.

Воспользовавшись формализмом (7) и уравнением голономной связи (2), получаем восемь дифференциальных уравнений, описывающих динамику манипулятора.

- По координате $q_1 = \varphi$:

$$|OA|^2 m_A \ddot{\varphi} = Q_\varphi + \lambda \frac{\partial f}{\partial \varphi} + m_A g |OA| \sin \varphi,$$

обобщенная сила Q_φ и частная производная $\frac{\partial f}{\partial \varphi}$ определяются выражениями

$$Q_\varphi = F_1 \frac{(y_M \cos \varphi + z_M \sin \varphi) |OA|}{l_1} +$$

$$+ F_4 \frac{(|DK| \sin \varphi - |OK| \cos \varphi) |OA|}{l_4},$$

$$\frac{\partial f}{\partial \varphi} = \frac{-x_M |OA| \cos \varphi}{x_M^2 + (y_M + |OA| \sin \varphi)^2}.$$

Тогда уравнение (4) принимает форму

$$\ddot{\varphi} = F_1 \frac{y_M \cos \varphi + z_M \sin \varphi}{|OA| m_A l_1} +$$

$$+ F_4 \frac{|DK| \sin \varphi - |OK| \cos \varphi}{|OA| m_A l_4} -$$

$$- \lambda \frac{x_M \cos \varphi}{|OA| m_A [x_M^2 + (y_M + |OA| \sin \varphi)^2]} + \frac{g}{|OA|} \sin \varphi;$$

- по координате $q_2 = \gamma$

$$E_2(T) = \lambda; \quad (9)$$

- по координатам $q_3 = x_M$, $q_4 = y_M$, $q_5 = z_M$, уравнения имеют вид

$$E_3(T) = F_1 \frac{x_M}{l_1} + F_2 \frac{x_M - |OB|}{l_2} + F_3 \frac{x_M + |OB|}{l_3} +$$

$$+ \lambda \frac{y_M + |OA| \sin \varphi}{x_M^2 + (y_M + |OA| \sin \varphi)^2}, \quad (10)$$

$$E_4(T) = F_1 \frac{y_M + |OA| \sin \varphi}{l_1} + F_2 \frac{y_M}{l_2} +$$

$$+ F_3 \frac{y_M}{l_3} - \lambda \frac{x_M}{x_M^2 + (y_M + |OA| \sin \varphi)^2}, \quad (11)$$

$$E_5(T) = F_1 \frac{z_M - |OA| \cos \varphi}{l_1} +$$

$$+ F_2 \frac{z_M}{l_2} + F_3 \frac{z_M}{l_3} - (M + m_W) g; \quad (12)$$

- по координатам $q_6 = \alpha$, $q_7 = \psi$, $q_8 = \beta$:

$$E_6(T) = T_\alpha -$$

$$- (m_3 l_{c3} + m_4 l_{c4} + m_W l_{cW}) g \cos \psi \cos \alpha; \quad (13)$$

$$E_7(T) = T_\psi +$$

$$+ (m_3 l_{c3} + m_4 l_{c4} + m_W l_{cW}) g \sin \psi \sin \alpha; \quad (14)$$

$$I_\beta (\ddot{\beta} + \ddot{\gamma} \sin \alpha - \ddot{\alpha} \sin \psi + \dot{\alpha} \dot{\gamma} \cos \alpha - \dot{\alpha} \dot{\psi} \cos \psi) -$$

$$- I_4 (\dot{\alpha} \dot{\gamma} \cos \alpha \cos \psi \cos 2\beta +$$

$$+ \dot{\alpha} \dot{\psi} \cos \psi \cos 2\beta + \dot{\psi} \dot{\gamma} \cos \alpha \sin 2\beta) = T_\beta; \quad (15)$$

$$I_4 = (I_{4y} + I_{Wy} - I_{4x} - I_{Wx}).$$

В соотношениях (8)—(15) $E_s(T)$ — это эйлеров оператор над функцией T :

$$E_s(T) = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_s}.$$

Полученные уравнения (8)—(15) совместно с уравнением связи (2) могут использоваться для определения динамических ошибок при выполнении программных перемещений $x_M^{pr}(t)$, $y_M^{pr}(t)$, $z_M^{pr}(t)$ рабочего органа [15]. Решение этой задачи связано с интегрированием дифференциальных уравнений [16]. Однако из-за инерционности механизмов редуктора и шариковинтовой пары исполнительных звеньев фактическая траектория $x_M(t)$, $y_M(t)$, $z_M(t)$ может отличаться от заданной. Если известны законы перемещения захвата манипулятора, необходимые для выполнения технологического процесса, можно найти движущие силы $F_k(t)$, $k = 1, \dots, 4$, и моменты $T_\psi(t)$, $T_\alpha(t)$, $T_\beta(t)$, обеспечивающие выполнение программного движения, а также значения динамических нагрузок в кинематических парах [17].

Результаты расчетов служат для выбора приводных электродвигателей, проведения прочностных расчетов элементов конструкции манипулятора, а также являются исходными данными для проектирования системы управления.

Динамический алгоритм системы управления перемещением рабочего органа по программным траекториям

Формирование управляющих усилий исполнительных приводов манипулятора-трипода осуществляется методом решения обратной задачи динамики с использованием алгоритма управления по ускорению [18]. Контуры управления исполнительными двигателями синтезируются в процессе построения алгоритма траекторного управления. Синтез алгоритма стабилизации программных перемещений захвата, заданных в параметрической форме, осуществляется по назначенной траектории, с использованием сигналов датчиков обратной связи.

Принимаем, что программная траектория точки крепления захвата манипулятора задана в параметрической форме $x_M^{pr}(t)$, $y_M^{pr}(t)$, $z_M^{pr}(t)$. Эти функции дважды дифференцируемы по времени и удовлетворяют граничным условиям

$$\begin{aligned} x_M^{pr}(0) &= x_{M0}, y_M^{pr}(0) = y_{M0}, z_M^{pr}(0) = z_{M0}, \\ \dot{x}_M^{pr}(0) &= \dot{x}_M^{pr}(\tau) = \dot{y}_M^{pr}(0) = \dot{y}_M^{pr}(\tau) = \dot{z}_M^{pr}(0) = \dot{z}_M^{pr}(\tau) = 0, \\ \ddot{x}_M^{pr}(0) &= \ddot{x}_M^{pr}(\tau) = \ddot{y}_M^{pr}(0) = \ddot{y}_M^{pr}(\tau) = \ddot{z}_M^{pr}(0) = \ddot{z}_M^{pr}(\tau) = 0, \end{aligned} \quad (16)$$

где τ — время перемещения захвата по траектории.

Аналитические выражения в виде полиномов для программных законов изменения длин $l_1^{pr}(t)$, $l_2^{pr}(t)$, $l_3^{pr}(t)$, $l_4^{pr}(t)$ исполнительных звеньев, углов поворота звеньев захватного устройства $\alpha^{pr}(t)$, $\psi^{pr}(t)$, $\varphi^{pr}(t)$ и конструктивный угол $\gamma^{pr}(t)$ определяются методами, изложенными в работах [10, 11]. Подставляя эти выражения в уравнения математической модели динамики манипулятора (8)—(15), получаем уравнения, из которых находятся законы изменения программных управляющих усилий и моментов $T_\psi(t)$, $T_\alpha(t)$, $T_\beta(t)$. Алгоритм формирования управляющих сигналов исполнительных приводов манипулятора-трипода и моментов находим из условия, что отклонения $\Delta q_j(t) = q_j^{pr}(t) - q_j(t)$ текущих значений обобщенных координат $q_1 = \varphi$, $q_3 = x_M$, $q_4 = y_M$, $q_5 = z_M$, $q_6 = \alpha$, $q_7 = \psi$, $q_8 = \beta$ от программных соответствуют решению дифференциального уравнения второго порядка

$$\Delta \ddot{q}_j(t) + b_{1j} \Delta \dot{q}_j(t) + b_{2j} \Delta q_j(t) = 0, \quad (17)$$

где b_{1j} , b_{2j} — постоянные положительные коэффициенты, определяющие характер переходного процесса.

Процесс (17) будет реализован в том случае, когда ускорения $\ddot{q}_j(t)$ изменения длин исполнительных звеньев определяются выражениями

$$\ddot{q}_j(t) = \ddot{q}_j^{pr}(t) + b_{1j} \Delta \dot{q}_j(t) + b_{2j} \Delta q_j(t). \quad (18)$$

Параметры этих уравнений позволяют изменять динамические характеристики управляемых перемещений захвата манипулятора. После подстановки выражения (18) в соотношения (8)—(15) находятся искомые законы изменения управляющих усилий, а управляющие напряжения находятся из уравнения (3).

Устойчивость алгоритма обеспечивается выбором коэффициентов b_{j1} , b_{j2} уравнения (18). Действительно, после подстановки управляющих усилий в соотношения (8)—(15), получаем дифференциальные уравнения кинематической траектории движения замкнутой системы

$$\begin{aligned} K_j \ddot{q}_j(t) + b_{1j} \dot{q}_j(t) + b_{2j} q_j(t) &= \\ = K_j \ddot{q}_j^{pr}(t) + b_{1j} \dot{q}_j^{pr}(t) + b_{2j} q_j^{pr}(t), \end{aligned} \quad (19)$$

где $K_1 = m_A |OA|^2$, $K_j = M + m_w$, $j = 3, \dots, 5$, $K_6 = I_\alpha$, $K_7 = I_\psi$, $K_8 = I_\beta$.

Общими решениями (18) являются функции

$$q_j(t) = q_j^{pr}(t) + C_{1j} e^{\beta_{1j} t} + C_{2j} e^{\beta_{2j} t}, \quad (20)$$

где C_{1j} , C_{2j} — постоянные, определяемые начальными условиями; β_1 , β_2 — корни характеристического уравнения (19).

Так как $b_{1j} > 0$, $b_{2j} > 0$, то действительная часть корней β_1 , β_2 всегда отрицательная, поэтому $q_j(t) \rightarrow q_j^{pr}(t)$ при $t \rightarrow \infty$. Методика выбора оптимальных значений этих коэффициентов изложена в работе [18].

Алгоритмы формирования управляющих напряжений, поступающих на входы электродвигателей исполнительных приводов манипулятора, находим с учетом статической характеристики электроприводов (3)

На рис. 3 приведена структурная схема системы управления, соответствующая сформулированному алгоритму управления исполнительными звеньями.

На рис. 3 $\mathbf{q}(t) = [\varphi, x_M, y_M, z_M, \alpha, \psi, \beta]$ — вектор обобщенных координат манипулятора.

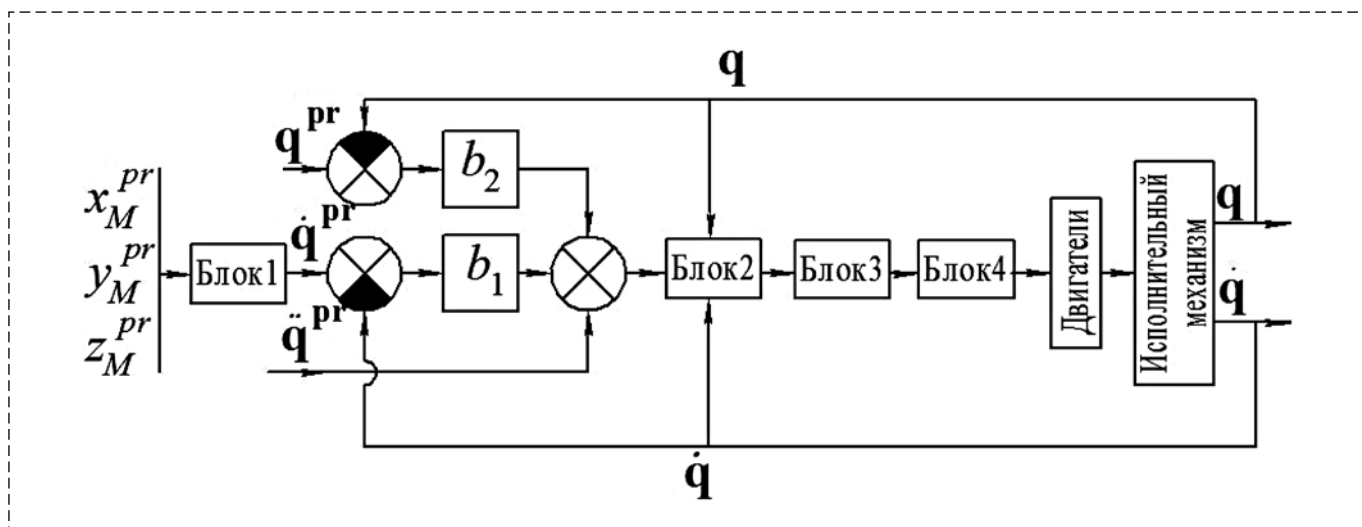


Рис. 3. Функциональная схема системы управления
Fig. 3. Functional capture of the control system

В блоке 1 осуществляется кинематический синтез программных законов изменения обобщенных координат манипулятора, в блоке 2 — решение уравнений системы (8)—(15), в блоке 3 определяются законы изменения программных управляющих усилий F_k^{pr} и моментов $T_\psi^{pr}, T_\alpha^{pr}, T_\beta^{pr}$, в блоке 4 — законы изменения программных управляющих напряжений u_k^{pr} . Обратные связи в контурах управления приводными двигателями осуществляются по переменным $q_j(t), \dot{q}_j(t)$. Значения этих переменных используются при вычислении выражений управляющих напряжений, а также при вычислении отклонений по положению $\Delta q_j(t)$, скорости $\Delta \dot{q}_j(t)$ и ускорению $\Delta \ddot{q}_j(t)$.

Изложенная методика требует большого объема вычислений, поэтому ее рационально можно использовать для частных видов движения манипулятора. Анализ технологических процессов показывает, что большинство операций может быть выполнено манипулятором с помощью конечного вида перемещений рабочего органа [19], для которых необходимо заранее сформировать базу математических моделей манипулятора и синтезировать системы управления. Частные виды перемещений звеньев манипулятора алгоритмизируются с помощью выражений кинетической и потенциальной энергий (4)—(6) заданием значений переменных $q_1 = \varphi, q_2 = \gamma, q_3 = x_M, q_4 = y_M, q_5 = z_M, q_6 = \alpha, q_7 = \psi, q_8 = \beta$, которые описывают конфигурацию манипулятора-трипода с поворотным основанием и состояние трехзвенного захватного устройства.

Пример формирования базы моделей и управлений

Кинематический синтез. В качестве примера реализации предложенных методов расчета программных перемещений исполнительных звеньев рассмотрим горизонтальное поступательное прямолинейное движение манипулятора последовательной структуры с тремя управляемыми степенями свободы $x_E = x_M = \text{const}, z_E = z_M = \text{const}, y_E(t) = y_M(t)$ из начальной точки с координатами $y_E(0) = 1100$ мм в конечную точку, с координатами $x_E(0) = x_E(\tau) = 200$ мм, $z_E(0) = z_E(\tau) = 190$ мм, $y_E(\tau) = 1600$ мм за время $\tau = 12$ с. Принимаем закон движения вдоль оси Oy [20] в виде

$$y_E(t) = y_E(0) + (10 - 15t/\tau + 6t^2/\tau^2) \times \times \frac{t^3}{\tau^3} (y_E(\tau) - y_E(0)), \tau \geq t \geq 0. \quad (21)$$

Уравнение движения (21) удовлетворяет граничным условиям (16). Пространственное положение рабочего органа задаем направляющими косинусами $\alpha_{23} = 0, \alpha_{33} = -1, \alpha_{13} = 0$ подвижной системы координат $O_4x_4y_4z_4$ рабочего органа относительно неподвижной системы координат $Oxyz$ (см. рис. 2 на четвертой стороне обложки). В этом случае обобщенные координаты захватного устройства равны $\alpha = -\frac{\pi}{2}, \beta = 0, \psi(t) = -\gamma(t)$.

Кинематический синтез законов перемещения исполнительных звеньев проводим интерполяцией первого и последнего участков

траектории сплайнами пятого порядка и методом точечной квадратичной аппроксимации промежуточных участков траектории [11]. Этот метод позволяет удовлетворить граничным условиям (16) и условиям непрерывности [21] на промежуточных участках траектории. Выбор числа узловых точек зависит от вида программного перемещения захвата. В рассматриваемом примере разбиваем интервал времени τ перемещения захвата на двенадцать равных частей. Находим координаты $x_E(t_i)$, $y_E(t_i)$, $z_E(t_i)$ узловых точек (21) в моменты времени $t_i = i\tau/12$, $i = 0, 1, 2, 3, \dots, 12$:

$$\begin{aligned} x_E(t_i) &= x_E(0) = 200 \text{ мм}, \\ y_E(t_i) &= y(t_i), z_E(t_i) = z_E(0) = 190 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (22)$$

Определяем [5, 6] конфигурацию манипулятора в начальный момент времени $l_k(0) = l_{k0}$, ($k = 1, \dots, 4$), $\alpha(0) = 0$, $\psi(0) = \psi_0 = -\gamma_0$. Затем находим конфигурацию манипулятора в каждый момент времени t_i . Таким образом, в моменты времени t_i известны длины исполнительных цилиндров $l_k(t_i)$, ($k = 1, \dots, 4$). Полученные значения используется для вычисления аппроксимирующих и интерполирующих полиномов, определяющих законы перемещения исполнительных приводов манипулятора. В результате расчетов по методике, изложенной в работе [11], получены функции $l_k^{pr}(t)$:

$$l_1^{pr}(t) = \begin{cases} P_1(t) = -37,87t^5 + 87,23t^4 - 49,49t^3, \\ 1 \geq t \geq 0, \\ Q_1(t) = 0,013t^5 - 0,384t^4 + 3,67t^3 - \\ -12,64t^2 + 26,82t + 1268,95, 11 \geq t \geq 1, \\ H_1(t) = -46,64t^5 + 2691,51t^4 - 62085,95t^3 + \\ + 71642,34t^2 - 4,12t + 9,49, 12 \geq t \geq 11; \end{cases}$$

$$l_2^{pr}(t) = \begin{cases} P_2(t) = -18,156t^5 + 41,40t^4 - 21,42t^3, \\ 1 \geq t \geq 0, \\ Q_2(t) = 0,015t^5 - 0,463t^4 + 4,136t^3 - \\ -7,208t^2 + 14,34t + 1209,208, 11 \geq t \geq 1, \\ H_2(t) = -15,28t^5 + 882,04t^4 - 20349,27t^3 + \\ + 234567,65t^2 - 1,35t + 3,11, 12 \geq t \geq 11. \end{cases}$$

$$l_3^{pr}(t) = \begin{cases} P_3(t) = -25,22t^5 + 57,64t^4 - 30,96t^3, \\ 1 \geq t \geq 0, \\ Q_3(t) = 0,02t^5 - 0,49t^4 + 4,53t^3 - \\ -10,11t^2 + 20,06t + 1317,122, 11 \geq t \geq 1, \\ H_3(t) = -20,34t^5 + 1173,95t^4 - 27081,68t^3 + \\ + 312156,61t^2 - 1,80t + 4,14, 12 \geq t \geq 11; \end{cases} \quad (23)$$

$$l_4^{pr}(t) = \begin{cases} P_4(t) = -21,55t^5 + 49,47t^4 - 27,33t^3, \\ 1 \geq t \geq 0, \\ Q_4(t) = 0,011t^5 - 0,33t^4 + 3,02t^3 - \\ -7,83t^2 + 16,03t + 973,54, 11 \geq t \geq 1, \\ H_4(t) = -24,98t^5 + 1441,63t^4 - 33256,53t^3 + \\ + 383350,63t^2 - 2,21t + 5,09, 12 \geq t \geq 11. \end{cases}$$

Для оценки точности отслеживания приводами манипулятора заданных программных перемещений захвата манипулятора строятся траектория и закон перемещения характерной точки $E[x_E(t), y_E(t), z_E(t)]$ рабочего органа манипулятора (см. рис. 1) по сформированным законам изменения длин исполнительных цилиндров (23). С этой целью, решая прямую задачу о положениях, определяем координаты точки $M(x_M, y_M, z_M)$ через обобщенные координаты манипулятора $l_k(t)$ ($k = 1, \dots, 4$), затем находим [12] законы изменения координат точки $E[x_E(t), y_E(t), z_E(t)]$.

На рис. 4, 5 (см. четвертую сторону обложки) приведены зависимости (23) длин $l_k^{pr}(t)$ и скоростей $\dot{l}_k^{pr}(t)$ исполнительных звеньев от времени, которые находятся как первые производные от функций $l_k^{pr}(t)$.

Динамический синтез. Уравнения динамики манипуляционной системы в конкретном случае перемещения рабочего органа получаем из соотношений (8)–(15) с учетом $x_M = \text{const}$, $y_M(t), z_M = \text{const}$, $\alpha = -\pi/2$, $\beta = 0$, $\psi(t) = -\gamma(t)$,

$$\begin{aligned} |OA|m_A\ddot{\phi} &= F_1 \frac{y_M \cos \phi + z_M \sin \phi}{l_1} - \\ &- F_4 \frac{|DK| \sin \phi + |OK| \cos \phi}{l_4} - \\ &- \lambda \frac{x_M \cos \phi}{x_M^2 + (y_M + |OA| \sin \phi)^2} + m_A g \sin \phi; \end{aligned} \quad (24)$$

$$0 = F_1 \frac{x_M}{l_1} + F_2 \frac{x_M - |OB|}{l_2} + F_3 \frac{x_M + |OB|}{l_3} + \lambda \frac{y_M + |OA| \sin \varphi}{x_M^2 + (y_M + |OA| \sin \varphi)^2}; \quad (25)$$

$$\ddot{y}_M (M + m_W) + (\ddot{\psi} \sin 2\psi + 2\dot{\psi}^2 \cos 2\psi) \times (m_3 l_{c3} + m_4 l_{c4} + m_W l_{cW}) = F_1 \frac{y_M + |OA| \sin \varphi}{l_1} + F_2 \frac{y_M}{l_2} + \quad (26)$$

$$+ F_3 \frac{y_M}{l_3} - \lambda \frac{x_M}{x_M^2 + (y_M + |OA| \sin \varphi)^2};$$

$$0 = F_1 \frac{z_M - |OA| \cos \varphi}{l_1} + F_2 \frac{z_M}{l_2} + F_3 \frac{z_M}{l_3} - g(M + m_W); \quad (27)$$

$$T_\alpha = -\ddot{y}_M \cos \gamma [m_2 l_{c2} + m_3 (a + l_{c3} \cos \psi) + m_4 (a + l_{c4} \cos \psi) + m_W (a + l_{cW} \cos \psi)] - \dot{\psi}^2 [m_3 l_{c3} (l_{c3} \sin^2 \psi + \cos \psi (a + l_{c3} \cos \psi)) + m_4 l_{c4} (l_{c4} \sin^2 \psi + \cos \psi (a + l_{c4} \cos \psi)) + m_W l_{cW} (l_{cW} \sin^2 \psi + \cos \psi (a + l_{cW} \cos \psi)) + I_{4x} + I_{3z} + I_{Wx}]; \quad (28)$$

$$\frac{1}{2} \dot{\psi}^2 \sin 2\psi (m_3 l_{c3}^2 + m_4 l_{c4}^2 + m_W l_{cW}^2 + I_{3x} + I_{3y}) + \ddot{\psi} [I_\psi + I_\gamma] + (\ddot{y}_M \sin 2\psi + g \sin \psi) \times (m_3 l_{c3} + m_4 l_{c4} + m_W l_{cW}) = T_\psi; \quad (29)$$

$$I_\beta \ddot{\psi} \sin \alpha = T_\beta. \quad (30)$$

Управляющие усилия $F_k^{pr}(t)$, моменты $T_\alpha^{pr}(t)$, $T_\psi^{pr}(t)$, $T_\beta^{pr}(t)$ и напряжения $u_k^{pr}(t)$, реализующие законы движения по программной траектории, находятся из уравнений (24)–(30) после подстановки выражений (18) для текущих значений ускорений. На рис. 6, 7 (см. четвертую сторону обложки) приведены законы изменения управляющих усилий и управляющих напряжений электродвигателей линейных исполнительных звеньях манипулятора-трипода. Расчеты проводили для следующих значений параметров актуаторов (максимальная допустимая скорость 60 мм/с, ход штока 610 мм) манипулятора и траектории: $M = 5,5$ кг, $m_{\Gamma p} = 2$ кг).

Заключение

В статье предлагается алгоритм синтеза управляющих напряжений, основанный на

решении обратной задачи динамики манипулятора, описываемой нелинейными дифференциальными уравнениями. Алгоритм формирования управляющих напряжений формируется с учетом кинематических параметров манипулятора по всем степеням свободы. Математическое моделирование показало, что предложенный алгоритм позволяет реализовать перемещение захвата по программной траектории с ошибкой не более 1 %. Алгоритм хорошо функционирует и при наличии начальных возмущений. Форма уравнений, характеризующих характер изменения отклонений, позволяет изменять динамические характеристики управляемых перемещений манипулятора. Приведенный алгоритм вычисления управляющих усилий относится к числу алгоритмов компенсирующего типа. Для повышения точности определения управляющих усилий необходимо математическую модель манипулятора дополнить динамической моделью динамики редуктора и шариковинтовой пары. Представленный алгоритм реализован в виде программы вычисления управляющих напряжений с помощью аппарата символьной математики MathCAD.

Список литературы

1. Афонин В. Л., Подзоров П. В., Слепцов В. В. Обработка оборудования на основе механизмов параллельной кинематики. Москва: Машиностроение, 2006.
2. Бушуев В. В., Хольшев И. Г. Механизмы параллельной структуры в машиностроении // СТН. 2001. № 1. С. 3–8.
3. Liu N., Wu J. Kinematics and application of a hybrid industrial robot Delta-RST. Sens. Transducers 169(4), 2014. P. 186–192.
4. Серков Н. А. Точность многокоординатных машин с ЧПУ: Теоретические и экспериментальные основы. Москва: ЛЕНАНД, 2015.
5. Робот-манипулятор FlexPicker IRB 360 компании AAB www.abb.com/robotics. URL: http://www.roboticturnkey-solutions.com/robots/abb/datasheet/IRB_360.pdf.
6. Шипилевский Г. Б., Викторов А. И. Автоматизация мобильных сельскохозяйственных агрегатов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2001. № 3. С. 28–29.
7. Жога В. В., Дяшкин-Титов В. В., Дяшкин А. В., Воробьева Н. С., Несмиянов И. А., Иванов А. Г. Манипулятор-трипод параллельно-последовательной структуры: пат. 2616493 Российская Федерация, МПК B66C 23/44. Опубл. 17.04.2017. Бюл. № 11.
8. Герасун В. М., Жога В. В., Несмиянов И. А., Воробьева Н. С., Дяшкин-Титов В. В. Определение зоны обслуживания мобильного манипулятора-трипода // Машиностроение и инженерное образование. 2013. № 3. С. 2–8.
9. Жога В. В., Дяшкин-Титов В. В., Несмиянов И. А., Воробьева Н. С. Задача позиционирования манипулятора параллельно-последовательной структуры с управляемым захватным устройством // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 8. С. 525–530.

10. Воробьева Н. С., Жога В. В., Несмиянов И. А. Отслеживание приводами манипулятора параллельно-последовательной структуры программных перемещений рабочего органа // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2019. № 2. С. 154—165.
11. Vorob'eva N. S., Zhoga V. V., Nesmiyanov I. A., Dyashkin A. V. Kinematic Synthesis of Programmed Motions of Drivers of a Manipulator-Tripod with a Three-Degree Gripper // Springer Nature Switzerland AG 2019 A. N. Evgrafov (ed.), Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-11981-2>
12. Воробьева Н. С., Дяшкин-Титов В. В., Жога В. В., Несмиянов И. А. Динамика манипулятора параллельно-последовательной структуры на основе трипода // Машиностроение и инженерное образование. 2017. № 3. С. 32—41.
13. Лурье А. И. Аналитическая механика. Москва: Наука, Физматлит., 1961. 824 с.
14. Jan Brinker, Burkhard Corves. Lagrangian Based Dynamic Analyses of Delta Robots with Serial-Parallel Architecture ROMANSY 21 // Robot Design, Dynamics and Control. 2016. Vol. 569. P. 133—141.
15. Staicu S. Dynamics modelling of a Stewart-based hybrid parallel robot // Adv. Robot. 2015. 29(14). P. 929—938.
16. Ibrahim O., Khalil W. Inverse and direct dynamic models of hybrid robots // Mech. Mach. Theory. 2010. 45(4). P. 627—640
17. Abhishek, S. Bellary, Monika Keerthana, M. Srinivasan, V. S. Varun, A. Dash, Anjan Kumar. Modelling and Workspace Analysis of Parallel-Serial Hybrid Manipulator // Applied Mechanics and Materials. 2015. P. 1028—1031.
18. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: нелинейные модели. Москва: Наука. Физматлит, 1988. 328 с.
19. Воробьева Н.С., Жога В. В., Дяшкин-Титов В. В., Дяшкин А. В. Разработка базы моделей манипулятора параллельно-последовательной структуры// Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 9. С. 143—152.
20. Коловский М. З., Слоущ А. В. Основы динамики промышленных роботов. Москва: Наука. Физматлит, 1998. 240 с.
21. Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора / Пер. с англ. М.: Наука. Физматлит, 1976. 104 с.

Dynamic Synthesis of Parallel-Sequential Structure Manipulator Control Algorithms

N. S. Vorob'eva, vgsha@mail.ru,

Volograd State Agrarian University, Volograd, 400002, Russian Federation,

V. V. Zhoga, viczhoga@gmail.com, L. V. Zhoga, levjog@mail.ru,

Volograd State Technical University, Volograd, 400005, Russian Federation,

Center for Technologies in Robotics and Mechatronics Components, Innopolis University, Innopolis, Tatarstan

Corresponding author: Vorob'eva Natalia Serg., Ph.D., Associate Professor, Head of Department, Volograd State Agrarian University, Volograd, 400002, Russian Federation, e-mail: vgsha@mail.ru

Accepted on April 14, 2020

Abstract

The paper is devoted to the development of an algorithm for the dynamic synthesis of control signals of actuators ensuring the required paths and application of motion laws of the manipulator's effector. A parallel-sequential structure (hybrid) manipulator has been considered, which consists of a manipulator-tripod on a rotary base and a sequential structure manipulator with three controlled degrees of freedom. The effector moves from a known position to a given final one by changing the lengths of the tripod executive links and the rotation angles of the sequential structure manipulator links. Non-linear dynamic equations obtained using the Lagrange equations with undetermined multipliers and additional holonomic constraints have been considered as a mathematical model of the controlled manipulator motions. The manipulator motions are determined by the nature of the process operation performed. In the paper, the issue of implementing the program effector paths predetermined in a parametric form has been resolved. First, the manipulator joint trajectories satisfying the given boundary conditions are determined. To do this, the effector motion laws are presented in a discrete form, and a point set characterizing the successive positions of the tripod actuators is determined by solving the optimization problem for the manipulator configuration (positional problem) providing minimum changes in the executive link lengths at each point of the effector path. Then, these values are interpolated by either a finite set of third and fourth-order splines or interpolation of the first and last path sections by fifth-order splines and the technique of point-based quadratic approximation of the intermediate path sections. The technique for the synthesis of dynamic algorithms for stabilizing the effector relative to a given position and implementing the program paths is based on generating the control signals of actuators by solving the inverse dynamic problem using a control signal generation algorithm provided that deviations from the current program path values are the solutions of a second-order differential equation. The actuator control circuits are synthesized when building the trajectory control algorithm. The numerical simulation results have been given that confirm the operability of the algorithm proposed on an example of the effector translation.

Keywords: parallel-sequential structure (hybrid) manipulator, program paths, program control signal synthesis algorithms

Acknowledgements: This article was prepared with the financial support of Russian Foundation for Basic Research (grant no. 19-48-340013 p_a.).

For citation:

Vorob'eva N. S., Zhoga V. V., Zhoga L. V. Dynamic Synthesis of Parallel-Sequential Structure Manipulator Control Algorithms, *Mechatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 12, pp. 706—715.

DOI: 10.17587/mau.21.706-715

References

1. Afonin V. L., Podzorov P. V., Sleptsov V. V. Processing equipment based on parallel kinematics mechanisms, Moscow, *Mashinostroenie*, 2006 (in Russian).
2. Bushuev V. V., Hol'shev I. G. The mechanisms of parallel structure in mechanical engineering. STIN, 2001, no. 1, pp. 3—8 (in Russian).
3. Liu N., Wu J. Kinematics and application of a hybrid industrial robot Delta-RST. Sens. Transducers 169(4), 2014, pp. 186—192.
4. Serkov N. A. Precision of multi-axis CNC machines: Teoreticheskie i eksperimental'nye osnovy, Moscow, LENAND, 2015 (in Russian).
5. Robot-manipulyator FlexPicker IRB 360 company AAB www.abb.com/robotics, available at: http://www.roboticturnkey-solutions.com/robots/abb/datasheet/IRB_360.pdf.
6. Shipilevskiy G. B., Viktorov A. I. Automation of mobile agricultural units, *Mekhanizatsiya i Elektrifikatsiya Sel'skogo Khozyaystva*, no. 3, 2001, pp. 28—29 (in Russian).
7. Zhoga V. V., Djashkin-Titov V. V., Djashkin A. V., Vorob'eva N. S., Nesmiyanov I. A., Ivanov A. G. Manipulator-tripod of parallel-sequential structure: pat. 2616493 Russian Federation, MPK B66C 23/44. Publ. 17.04.2017. Bul. No. 11 (in Russian).
8. Gerasun V. M., Zhoga V. V., Nesmiyanov I. A., Vorob'eva N. S., Dyashkin-Titov V. V. Determining the service area of a mobile manipulator-tripod, *Mashinostroenie i Inzhenernoe Obrazovanie*, 2013, no. 3, pp. 2—8 (in Russian).
9. Zhoga, V. V., Dyashkin-Titov V. V., Nesmiyanov I. A., Vorob'eva N. S. The task of positioning the manipulator of a parallel-sequential structure with a controlled gripper, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, no. 8, vol. 17, pp. 525—530 (in Russian).
10. Vorob'eva N. S., Zhoga V. V., Nesmiyanov I. A. Program Displacement Tracing of executive devices by the manipulator drives of parallel-sequential Structures, *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 2019, no. 2, pp. 154—165 (in Russian).
11. Vorob'eva N. S., Zhoga V. V., Nesmiyanov I. A., Dyashkin A. V. Kinematic Synthesis of Programmed Motions of Drivers of a Manipulator-Tripod with a Three-Degree Gripper, Springer Nature Switzerland AG 2019 A. N. Evgrafov (ed.), *Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-11981-2>.
12. Vorob'eva N. S., Dyashkin-Titov V. V., Zhoga V. V., Nesmiyanov I. A. Dynamics of a parallel — sequential structure manipulator based on a tripod, *Mashinostroenie i Inzhenernoe Obrazovanie*, 2017, no. 3, pp. 32—41 (in Russian).
13. Lur'e A. I. Analytical Mechanics, Moscow, Nauka, Fizmatlit, 1961, 824 p. (in Russian).
14. Jan Brinker, Burkhard Corves. Lagrangian Based Dynamic Analyses of Delta Robots with Serial-Parallel Architecture ROMANSY 21 — Robot Design, *Dynamics and Control*, 2016, vol. 569, pp. 133—141.
15. Staicu S. Dynamics modelling of a Stewart-based hybrid parallel robot, *Adv. Robot*, 29(14), 2015, pp. 929—938.
16. Ibrahim O., Khalil W. Inverse and direct dynamic models of hybrid robots, *Mech. Mach. Theory*, 45(4), 2010, pp. 627—640.
17. Abhishek, S. Bellary, Monika Keerthana, M. Srinivasan, V. S. Varun, A. Dash, Anjan Kumar. Modelling and Workspace Analysis of Parallel-Serial Hybrid Manipulator, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, pp. 1028—1031.
18. Krut'ko P. D. Inverse problems of dynamics of controlled systems: nonlinear models, Moscow, Nauka, Fizmatlit, 1988, 328 p. (in Russian).
19. Vorob'eva N. S., Zhoga V. V., Dyashkin-Titov V. V., Dyashkin A. V. Development of a model base for a parallel-sequential manipulator structure, *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 9, pp. 143—152 (in Russian).
20. Kolovskiy M. Z., Sloushch A. V. Foundations of Industrial Robot Dynamics, Moscow, Nauka, Fizmatlit, 1998, 240 p. (in Russian).
21. Pol R. Simulation, trajectory planning, and motion control of the robot manipulator, Trans. from the English, Moscow, Nauka, Fizmatlit, 1976, 104 p. (in Russian).



31 мая – 02 июня 2021 г.

в Санкт-Петербурге
на базе ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
состоится



XXVIII Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам

Тематика конференции

- Инерциальные датчики, системы навигации и ориентации
- Интегрированные системы навигации и управления движением
- Глобальные навигационные спутниковые системы
- Средства гравиметрической поддержки навигации

В рамках каждого направления рассматриваются:

- схемы построения и конструктивные особенности;
- методы и алгоритмы;
- особенности разработки и применения для различных подвижных объектов и условий движения (аэрокосмические, морские, наземные, подземные);
- испытания и метрология.

Контактная информация:

Тел.: +7 (812) 499 82 10 +7 (812) 499 81 57

Факс: +7 (812) 232 33 76 E-mail: icins@eprib.ru