

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 621.865.8+62-503.53

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-51-66

Мультиагентное управление механизмом параллельной структуры на основе декомпозирующего подхода*

А.Р. ГАЙДУК¹, С.Г. КАПУСТЯН², Е.А. ПЛАКСИЕНКО³,
К.В. КОЛОКОЛОВА⁴

¹ 347922, РФ, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, Институт радиотехнических систем и управления, Южный федеральный университет; 357700, РФ, г. Кисловодск, пр. Победы, 37а, Кисловодский гуманитарно-технический институт, доктор технических наук, профессор. E-mail: gaiduk_2003@mail.ru

² 347928, РФ, г. Таганрог, ул. Чехова, 2, ЮНЦ РАН, ведущий научный сотрудник; НИИ МВС им. академика А.В. Каляева ЮФУ, зав. отделом, доктор технических наук. E-mail: kap56@mail.ru

³ 347900, РФ, г. Таганрог, ул. Петровская, 45, Таганрогский институт управления и экономики, доцент. E-mail: putkad@mail.ru

⁴ 347922, РФ, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, Институт радиотехнических систем и управления, Южный федеральный университет, ассистент. E-mail: kbesklubova@mail.ru

В последние годы вместо манипуляторов консольного типа все чаще применяются механизмы параллельной структуры. Эти механизмы позволяют достигать более высоких скоростей, ускорений и точности движений рабочих инструментов, обусловленных такими технологическими операциями, как раскрой и лазерная резка листовых материалов, сборка, сварка и другие. В связи с этим задача разработки методов синтеза соответствующих управлений становится весьма актуальной. Известные методы синтеза приводят к достаточно сложным системам управления как в плане их синтеза, так и в плане реализации. Одним из наиболее сложных моментов, особенно при синтезе управлений, оптимальных в смысле квадратичных критериев, является учет ограниченности рабочей области механизмов параллельной структуры. Ниже предлагается метод синтеза мультиагентного управления механизмами параллельной структуры на примере управления триподом. Законы и алгоритмы управления строятся на основе декомпозирующего подхода и метода аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям (АССУВВ). Применение этого аналитического метода позволяет создавать мультиагентные системы управления механизмами параллельной структуры с необходимыми показателями качества в переходном и в установившемся режиме. В данной работе используется известная математическая модель трипода. Показано, что желаемые траектории движений рабочих инструментов целесообразно формировать исходя из операций, обуслов-

* Статья получена 22 сентября 2017 г.

Исследование выполнено в ЮФУ при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-58-00226 и № 16-08-00013.

ленных назначением разрабатываемого манипулятора. Эффективность предложенного подхода подтверждается результатами компьютерного моделирования.

Разработанный подход может применяться для создания мультиагентных манипуляторов с механизмами параллельной структуры для решения широкого круга задач: внесения удобрений, осуществления экологических наблюдений, повышения качества систем технического зрения, выполнения многих производственных технологических операций.

Ключевые слова: манипулятор консольный, механизм параллельной структуры, трипод, траектория, управление, система, синтез, декомпозирующий подход, управление по выходу и воздействиям

ВВЕДЕНИЕ

Роботы с последовательной кинематической схемой манипуляторов (консольного типа) достаточно часто применяются при автоматизации промышленных производств, особенно серийного характера [1–3]. Однако они могут применяться и для других целей. Так, в работе [4] исследуются особенности конструкции, структуры и систем управления лазер-роботов; в [5] показана целесообразность применения роботизированных комплексов для внесения удобрений. Информационная система таких комплексов может одновременно учитывать редукцию нитратов почвы, вариабельность внутрипольных контуров и легкоподвижных форм азота, фосфора и калия, а также экологическую пластичность растений по отношению к плодородию почвы, что позволит существенно повысить эффективность сельскохозяйственного производства. Робототехнические комплексы находят применение при экологических наблюдениях [6] и решении многих других задач.

Роботы, имеющие манипуляторы консольного типа, обладают рядом достоинств, однако они не позволяют осуществлять перемещение больших масс, особенно на больших скоростях, и обеспечивать позиционирование с высокой точностью. Это обусловлено пониженной жесткостью манипуляторов консольной конструкции, поэтому для получения требуемых качественных характеристик приходится существенно увеличивать массу плеч манипулятора и, соответственно, мощность приводов. В связи с этим в последнее время все шире применяются манипуляторы параллельной структуры [7–11]. Такие манипуляторы обладают лучшей грузоподъемностью и повышенной жесткостью, позволяют достигать более высоких скоростей, ускорений и точности перемещения рабочих инструментов. Например, в работе [11] предлагается в оптических системах технического зрения вместо консольных роботов применять механизмы параллельной структуры на основе пьезоэлектрических актуаторов. Это позволяет повысить компактность, жесткость, быстродействие и точность манипуляторов трехмерных систем стабилизации оптических приборов.

Обычно манипуляторы параллельной структуры применяются для обеспечения пространственных поступательных или вращательных движений схвата, в котором помещается рабочий инструмент. Движения таких типов необходимы при выполнении многих технологических операций, таких как раскрой и лазерная резка листовых материалов, сборка, сварка и др. [1–3, 7].

Кинематическая схема механизмов параллельной структуры (МПС) несколько сложнее схемы манипуляторов консольной конструкции, что обусловлено наличием нескольких взаимосвязанных, параллельных кинематических звеньев. Множественность параллельных звеньев осложняет решение

задачи управления движениями МПС, но согласованное управление этими кинематическими звеньями дает возможность реализовать достаточно сложные пространственные движения схвата [7, 9–11]. Практически для управления МПС необходимо синтезировать многомерную систему автоматического управления (МСАУ), так как этот механизм по сути является многоканальным объектом со взаимосвязанными каналами [12, 13].

Синтез систем управления пространственными движениями схвата МПС рассматривалась во многих работах [13–20] и др. Чаще всего при этом используются системы оптимального управления [11, 14, 15]. Весьма эффективным является применение принципов стайного управления, а также сетевидного и мультиагентного подходов [18–20]. Мультиагентный подход приводит к декомпозиции [13] задачи управления МПС на несколько одноканальных задач. Каждая из них решается параллельно соответствующим интеллектуальным агентом, но с учетом необходимых взаимосвязей. Математические модели МПС обычно являются динамическими и представляют собою системы нелинейных дифференциальных уравнений весьма высоких порядков [6, 7, 14].

В данной работе рассматривается задача аналитического синтеза мультиагентной системы автоматического управления (МСАУ) механизмом параллельной структуры на основе трипода. Применение совокупности нескольких агентов, позволяет существенно упростить синтез системы управления триподом и ее практическую реализацию. Основной задачей работы является разработка алгоритмов функционирования агентов, которая осуществляется на основе декомпозирующего управления и метода аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям (АСС с УВВ) [12, 13, 21, 22].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Конструкция трипода, используемого в рассматриваемом манипуляторе, полностью аналогична конструкции трипода, показанного на рис. 1, который взят из работы [14]. Трипод имеет основание в виде равнобедренного треугольника 5. К нему на шарнирах крепятся три звена 1, 2, 3, концы которых связаны между собой в точке 6 специальным пятиподвижным шарнирным узлом. К этому шарниру крепится схват с рабочим инструментом. Каждое звено 1, 2, 3, а также 4 представляет собою пару «ходовой винт–гайка», поэтому при вращении винта электродвигателем постоянного тока изменяется длина звена. При этом схват совершает необходимые технологические движения в пределах рабочей зоны, размеры которой определяются минимальными и максимальными длинами звеньев.

Для увеличения рабочей зоны может изменяться угол наклона основания 5 за счет изменения длины звена 4. Фактически каждая пара «винт–гайка» и электродвигатель являются исполнительным механизмом, а напряжения, формируемые соответствующим агентом и подаваемые на двигатели звеньев 1, 2 и 3, являются управлениями рассматриваемого в данной работе манипулятора. Длина звена 4 изменяется при необходимости увеличения рабочей зоны манипулятора, но в данном случае является фиксированной.

На рис. 2 приведена кинематическая схема трипода и принятая система координат $Oxyz$ [8, 14]. Точка в середине стороны ВС треугольного основания ABC является началом системы координат. Ось Ox направлена вправо,

ось Oy – параллельно продольной оси манипулятора и робота, а ось Oz – вертикально вверх. Основание ABC поворачивается вокруг стороны BC за счет изменения величины l_4 , т. е. длины звена 4. При этом изменяется угол φ – угол наклона основания ABC по отношению к вертикали.

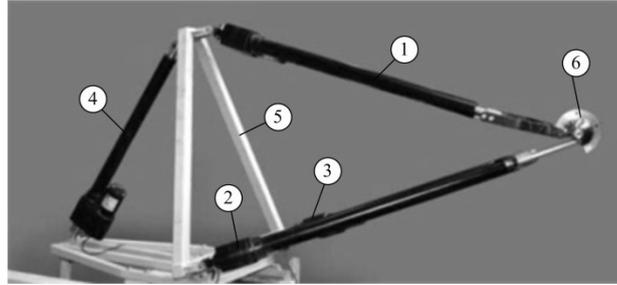


Рис. 1. Трипод манипулятора

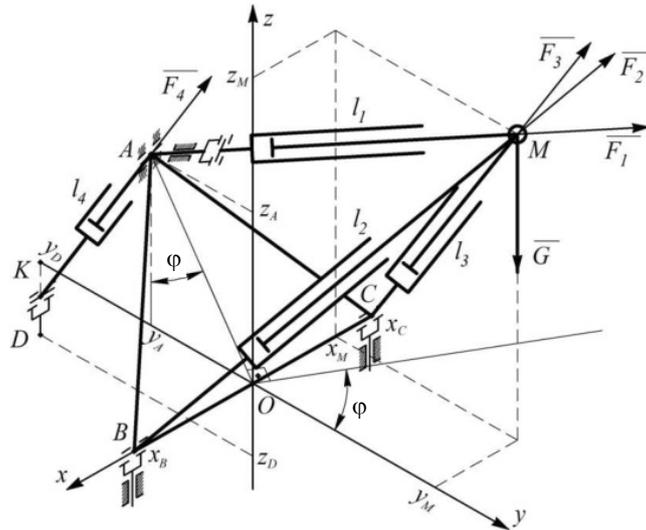


Рис. 2. Кинематическая схема манипулятора-трипода

Так как схват крепится в точке M , то его положение определяется координатами именно этой точки, которая перемещается в рабочем пространстве трипода за счет изменения длин l_1, l_2, l_3 управляемых звеньев $1, 2, 3$. Обозначим координаты этой точки следующим образом: $x_M = x_1(t)$, $y_M = x_3(t)$ и $z_M = x_5(t)$. Тогда они будут связаны с длинами l_1, l_2, l_3 управляемых звеньев $1, 2, 3$ формулами

$$l_1 = \sqrt{x_1^2 + (x_3 + a)^2 + (x_5 - c)^2}, \quad l_2 = \sqrt{(x_1 - b)^2 + x_3^2 + x_5^2},$$

$$l_3 = \sqrt{(x_1 + b)^2 + x_3^2 + x_5^2},$$
(1)

где $a = OA \sin \varphi$, $b = OB$, $c = OA \cos \varphi$; OA, OB – геометрические параметры основания манипулятора и точек его крепления на поворотном основании (рис. 2).

Математическая модель трипода, полученная, в частности, в работах [8, 14] на основе уравнений Лагранжа с неопределенными множителями, при $\varphi = \text{const}$ описывается системой следующих дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = \frac{F_1}{ml_1}x_1 + \frac{F_2}{ml_2}(x_1 - x_B) + \frac{F_3}{ml_3}(x_1 + x_B); \quad (2)$$

$$\dot{x}_3 = x_4, \quad \dot{x}_4 = \frac{F_1}{ml_1}(x_3 + d_3) + \frac{F_2}{ml_2}x_3 + \frac{F_3}{ml_3}x_3; \quad (3)$$

$$\dot{x}_5 = x_6, \quad \dot{x}_6 = \frac{F_1}{ml_1}(x_5 - d_5) + \frac{F_2}{ml_2}x_5 + \frac{F_3}{ml_3}x_5 - g; \quad (4)$$

$$y = [x_1 \ x_3 \ x_5]^T = [x_M \ y_M \ z_M]^T. \quad (5)$$

В уравнениях (1)–(5) $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T$ – вектор состояния; $F = F(t) = [F_1(t) F_2(t) F_3(t)]$ – вектор управляющих усилий, создаваемых соответствующими электроприводами трипода; g – ускорение свободного падения.

Отметим, что в выражениях (1)–(5) переменные $x_1 = x_M$, $x_3 = y_M$, $x_5 = z_M$ являются координатами точки схвата M , а переменные x_2 , x_4 , x_6 – соответственно проекциями скорости этой точки на оси координат Ox , Oy , Oz [14]. Таким образом, используемый в рассматриваемом манипуляторе трипод является динамической системой 6-го порядка.

Задача синтеза мультиагентного управления заключается в построении алгоритмов функционирования агентов, которые управляют изменением длин l_1 , l_2 , l_3 управляющих звеньев. При этом должны учитываться ограничения на допустимые изменения указанных длин, которые имеют вид

$$l_{\min,i} \leq l_i \leq l_{\max,i}, \quad i = \overline{1, 3}, \quad (6)$$

где $l_{\min,i}$ и $l_{\max,i}$ – минимально и максимально возможные значения длин управляющих звеньев трипода, которые обусловлены конструкцией последних.

2. ДЕКОМПОЗИЦИЯ МОДЕЛИ ТРИПОДА

Чтобы упростить решение задачи, воспользуемся декомпозирующим подходом [12, 13], который позволяет преобразовать многоканальную задачу (1)–(6) в ряд одноканальных задач управления. С этой целью введем два новых вектора \tilde{x}_I и \tilde{x}_{II} следующим образом: $\tilde{x}_I = [\tilde{x}_1 \ \tilde{x}_2 \ \tilde{x}_3] = [x_1 \ x_3 \ x_5]$; $\tilde{x}_{II} = [\tilde{x}_4 \ \tilde{x}_5 \ \tilde{x}_6] = [x_2 \ x_4 \ x_6]$. Тогда уравнения (2)–(5) примут вид

$$\dot{\tilde{x}}_I = E\tilde{x}_{II}, \quad \dot{\tilde{x}}_{II} = B(\tilde{x})F + e_3 g, \quad (7)$$

где E и e_3 – единичная 3×3 -матрица и ее 3-й столбец; вектор $F = [F_1 \ F_2 \ F_3]^T$, а матрица

$$B(\tilde{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\tilde{x}_1}{ml_1} & \frac{\tilde{x}_1 - x_B}{ml_2} & \frac{\tilde{x}_1 + x_B}{ml_3} \\ \frac{\tilde{x}_2 + d_3}{ml_1} & \frac{\tilde{x}_2}{ml_2} & \frac{\tilde{x}_2}{ml_3} \\ \frac{\tilde{x}_3 - d_5}{ml_1} & \frac{\tilde{x}_3}{ml_2} & \frac{\tilde{x}_3}{ml_3} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Как показано в работе [12], задача декомпозиции системы (7) имеет решение, если только определитель матрицы $B(\tilde{x})$ (8) не равен нулю. В данном случае на основе выражения (8) имеем

$$\det B(\tilde{x}) = \frac{2x_B(d_3\tilde{x}_3 + d_5\tilde{x}_2)}{m^3 l_1 l_2 l_3} = D_B(\tilde{x}). \quad (9)$$

Так как $x_B \neq 0$ (см. рис. 2), то условие $\det B(\tilde{x}) \neq 0$, очевидно, выполняется, если

$$d_3\tilde{x}_3 + d_5\tilde{x}_2 = d_3x_5 + d_5x_3 = OA(z_M \sin\varphi + y_M \cos\varphi) \neq 0. \quad (10)$$

Не трудно видеть, что неравенство (10) всегда может быть выполнено путем соответствующего изменения угла φ , поэтому далее будем считать, что это условие выполнено. Таким образом, условие (10) обеспечивает существование решения задачи декомпозиции математической модели рассматриваемого трипода (см. рис. 1). Решение этой задачи можно получить на основе декомпозирующего подхода, предложенного в работе [12], в соответствии с которым в случае системы (7) управление

$$F = \frac{1}{D_B(\tilde{x})} \text{adj} B(\tilde{x}) v, \quad (11)$$

где $v = [v_1 \ v_2 \ \tilde{v}_3]^T$ – вектор управления; $\text{adj} B$ – обозначение присоединенной матрицы. Отметим, что существование управления (11) гарантируется условием (10).

Подставив выражение (11) в уравнение (7), с учетом известного свойства присоединенной матрицы $B \text{adj} B = E \det B$ [12] и обозначения (9) получим уравнения

$$\dot{\tilde{x}}_I = E\tilde{x}_{II}, \quad \dot{\tilde{x}}_{II} = Ev + e_3 g. \quad (12)$$

Принимая во внимание вектор $v = [v_1 \ v_2 \ \tilde{v}_3]^T$ и возвращаясь к исходным переменным x_i , $i = \overline{1, 3}$, запишем систему уравнений (12) следующим образом:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = v_1, \quad \dot{x}_3 = x_4, \quad \dot{x}_4 = v_2, \quad \dot{x}_5 = x_6, \quad \dot{x}_6 = \tilde{v}_3 - g. \quad (13)$$

Далее введем три новых вектора состояния w_1, w_2, w_3 , полагая

$$w_1 = [x_1 \ x_2]^T, \quad w_2 = [x_3 \ x_4]^T, \quad w_3 = [x_5 \ x_6]^T. \quad (14)$$

С учетом обозначений (17) в векторно-матричной форме системы уравнений (16) записываются таким образом:

$$\begin{aligned} \dot{w}_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} w_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_1, & \dot{w}_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} w_2 + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_2, \\ \dot{w}_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} w_3 + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tilde{v}_3 - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} g. \end{aligned} \quad (15)$$

Третья система (15) отличается от первых двух наличием постоянного по величине возмущения, равного g . Для получения аналогичных структур всех систем (15) введем новое управление v_3 , полагая

$$\tilde{v}_3 = v_3 + g. \quad (16)$$

С учетом выражения (16) все три уравнения (15) записываются следующим образом:

$$\dot{w}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} w_i + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (17)$$

Из выражений (15) и (17) следует, что задача управления триподом (см. рис. 1) может быть решена путем применения трех практически аналогичных агентов, каждый из которых решает задачу управления одной из систем второго порядка (17). Формально решения этих систем не зависят друг от друга, однако их практическая реализация должна осуществляться с учетом совместных соотношений (11), (16) и ограничений (6), (10).

3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА

По отношению к уравнениям (17) задача синтеза заключается в определении законов изменения во времени управлений $v_i = v_i(t)$, $i = 1, 2, 3$, т. е. алгоритмов действий агентов при осуществлении ими управления триподом. Как показывает анализ работ, посвященных управлению триподом, чаще всего ставится задача оптимального управления, которая заключается в переводе точки M из произвольного начального состояния $\tilde{x}_{I0} = [x_{M0} \ y_{M0} \ z_{M0}]$, $\tilde{x}_{II0} = 0$ в заданное конечное состояние $\tilde{x}_{I1} = [x_{M1} \ y_{M1} \ z_{M1}]$, $\tilde{x}_{II1} = 0$. При этом процесс перехода трипода должен проходить так, чтобы некоторый квадратичный критерий качества имел минимальное значение при выполнении ограничений (6) и (10) [8, 14, 15].

Для решения задачи оптимизации в нашем случае перейдем к уравнениям в отклонениях. Пусть $z_i(t) = w_i(t) - w_{i0}$ – отклонения векторов состояния, а $u_i(t) = v_i(t) - v_{i0}$ – отклонения управлений, $i = 1, 2, 3$. Так как системы (17)

являются линейными, то их уравнения в отклонениях совпадают с уравнениями (17), т. е.

$$\dot{z}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} z_i + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (18)$$

Применительно к системам (18) задача управления состоит в переводе каждой из этих систем из заданных начальных состояний $[w_{i0} \ 0]^T \neq 0$ в заданные конечные состояния $[w_{i1} \ 0]^T \neq 0$, т. е. в конечные состояния $z_{i1} = [z_{i1} \ 0]^T = 0$, так чтобы выполнялись условия

$$J_i = \int_0^\infty [z_i^T Q_i z_i + r_i u_i^2] dt \rightarrow \min_{u_i} \quad \text{при} \quad Q_i = \begin{bmatrix} q_{i1} & 0 \\ 0 & q_{i2} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (19)$$

с учетом ограничений (6) и (11). С этой целью управления u_i в (18), обеспечивающие выполнение условия (19), имеют вид

$$u_i^\circ = \gamma_i (g_i - k_{i1}^\circ z_{i1} - k_{i2}^\circ z_{i2}) = \gamma_i (g_i - k_i^{\circ T} z_i). \quad (20)$$

Здесь g_i – заданные значения изменения переменных w_{i1} $i = 1, 2, 3$. Значения коэффициентов k_i вектора k° из (20) определяются решением соответствующего уравнения Риккати, а коэффициенты – $\gamma_i = k_{i1}^\circ$. Эти значения γ_i выбираются из условий равенства нулю коэффициентов ошибки C_{i0} по задающим воздействиям g_i синтезируемых систем (18) и (20) [22, 23].

Так как уравнения (18) имеют каноническую управляемую форму, а их характеристические уравнения имеют вид $p^2 = 0$ при всех $i = 1, 2, 3$, то, следуя [23], легко установить, что оптимальные векторы k_i° в выражениях (20) определяются выражениями

$$k_i^{\circ T} = \left[\sqrt{q_{i1}} \quad \sqrt{q_{i2} + 2\sqrt{r_i q_{i1}}} \right] / \sqrt{r_i}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (21)$$

где r_i, q_{i1}, q_{i2} – параметры из выражений (19). Соотношения (21) при заданном функционале (19) однозначно определяют значения коэффициентов $k_{i1}^\circ, k_{i2}^\circ$ оптимального управления (20). Однако для реализации этого управления необходимо иметь значения $g_i = z_{i1}$, т. е. значения переменных z_{i1} , $i = 1, 2, 3$ желаемого конечного состояния точки M трипода. Эти значения должны определяться с учетом ограничений (6) и (10).

4. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРИПОДОМ

Из приведенных соотношений вытекает следующий алгоритм оптимального, мультиагентного управления триподом (рис. 1).

Для работы этого алгоритма управления триподом по переводу его точки M из начального положения M_0 в конечное M_1 необходимы следующие

исходные данные: $OA, OB, l_{i\min}, l_{i\max}, m, x_B, \varphi, g, q_{11}, q_{12}, r_1, q_{21}, q_{22}, q_{23}, r_2, q_{31}, q_{32}, q_{33}, r_3, x_{M0}, y_{M0}, z_{M0}, x_{M1}, y_{M1}, z_{M1}, v_{i0}, i=1, 2, 3$. Здесь v_{i0} – значение управления u_i , под действием которого система пришла в точку M_0 . Собственно алгоритм включает следующие шаги.

Шаг 1. Полагаются $g_i = z_{i1} = w_{i1} - w_{i0}, z_{i0} = 0, i=1, 2, 3; w_{1\mu} = x_{M\mu}, w_{2\mu} = y_{M\mu}, w_{3\mu} = z_{M\mu}, \mu=1, 2$. По формулам (21) и (20) вычисляются значения $u_i^\circ(t), i=1, 2, 3$, и все системы (18) интегрируются по времени от 0 до ∞ , т. е. на интервале от M_0 до M_1 и находятся векторы $z_i(t), i=1, 2, 3$. При этом значения параметров r_i, q_{i1}, q_{i2} выбираются такими, чтобы переходный процесс не имел перерегулирования.

Шаг 2. По значениям $z_i(t)$ и $u_i^\circ(t)$ вычисляются значения $w_i(t)$ и $v_i(t)$ по формулам $w_i(t) = w_{i0} + z_i(t)$ и $v_i(t) = u_i^\circ(t) + v_{i0}, i=1, 2$, и $v_3(t) = u_3^\circ(t) + v_{30}$. Находятся переменные $x_i(t)$ по формулам $[x_1 \ x_2]^T = [w_{11} \ w_{12}]^T, [x_3 \ x_4]^T = [w_{21} \ w_{22}]^T, [x_5 \ x_6]^T = [w_{31} \ w_{32}]^T$ и переменные $\tilde{x}_i(t)$ по формулам $\tilde{x}_1 = x_1, \tilde{x}_2 = x_3, \tilde{x}_3 = x_5, \tilde{x}_4 = x_2, \tilde{x}_5 = x_4, \tilde{x}_6 = x_6$. По формулам (16) вычисляется управление $\tilde{v}_3(t)$ и составляется вектор $v(x) = [v_1(x) \ v_2(x) \ \tilde{v}_3(x)]$.

Шаг 3. Проверяется выполнение условий (10) и (6) вдоль всей оптимальной траектории. Если эти условия не выполняются, то некоторая точка траектории оказывается вне рабочей зоны трипода при данном значении угла φ . В этом случае изменяется угол φ и повторяются шаги 1, 2 и 3 до тех пор, пока все точки оптимальной траектории не будут удовлетворять условиям (10) и (6). При выполнении этих условий выполняется переход к шагу 4.

Шаг 4. По формулам (8), (9) и (11) вычисляются матрица $B(\tilde{x})$, ее определитель – полином $D_B(x) = \det B(\tilde{x})$ и вектор управлений $F = F(x)$. Если все значения $F(x)$ не превышают допустимых значений, то по формулам (1) определяются оптимальные законы изменения длин $l_1^\circ(x), l_2^\circ(x), l_3^\circ(x)$.

Шаг 5. Так как найденные выше переменные $x_i = x_i(t), i=1, \overline{6}$, являются функциями времени, то полученные функции $l_1^\circ(x), l_2^\circ(x), l_3^\circ(x)$ фактически представляют собою оптимальные законы изменения во времени длин управляемых звеньев 1, 2 и 3 агентами с целью перевода точки M трипода из начального положения M_0 в конечное M_1 . Поэтому на данном шаге эти функции подаются агентами на входы соответствующих электроприводов, которые обрабатывают их, обеспечивая оптимальное перемещение точки M трипода. В установившемся режиме будут выполняться условия: $x_{1\text{уст}} = x_{M1}, x_{3\text{уст}} = y_{M1}, x_{5\text{уст}} = z_{M1}$, что соответствует положению точки M трипода в заданном положении M_1 . Приведенный алгоритм, вообще говоря, позволяет реализовать оптимальную траекторию перехода рабочего инструмента трипода из точки M_0 в точку M_1 , которая определяется коэффициентами функ-

ционала (22). Такая траектория может иметь достаточно сложный характер и, как видно, учет ограничений существенно усложняет ее построение.

Представляется более рациональным задавать траекторию движения инструмента из M_0 в M_1 исходя из технологических соображений. Например, согласно [8, 10] для наискорейшего перехода из точки M_0 в точку M_1 траектория должна быть прямолинейной. Естественно, она может соответствовать и другой кривой, например параболе. В этом случае значительно проще учесть указанные выше ограничения, а назначенную траекторию целесообразно обрабатывать по шагам.

В рассматриваемом триподе (см. рис. 1) изменение длин управляющих звеньев, за счет чего происходит перемещение его схвата (точки M) по заданной траектории, осуществляется электроприводами, поэтому агенты должны формировать задающие воздействия для этих приводов. При шаговом движении точки M агенты формируют задающие воздействия g_{li} , $i = 1, 2, 3$, в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} g_{11}(t) &= \sqrt{x^2(t) + (y(t) + a)^2 + (z(t) - c)^2}, \\ g_{12}(t) &= \sqrt{(x(t) - b)^2 + y^2(t) + z^2(t)}, \\ g_{13}(t) &= \sqrt{(x(t) + b)^2 + y^2(t) + z^2(t)}, \end{aligned} \quad (22)$$

где $a = OA \sin \varphi$, $c = OA \cos \varphi$, $b = 0,5BC$ (см. рис. 2),

$$\begin{aligned} x(t) &= x[k\Delta_t] + \Delta_{x(k+1)}1(t - k\Delta_t), \quad y(t) = y[k\Delta_t] + \Delta_{y(k+1)}1(t - k\Delta_t), \\ z(t) &= z[k\Delta_t] + \Delta_{z(k+1)}1(t - k\Delta_t), \quad k\Delta_t \leq t \leq (k+1)\Delta_t, \quad k = 0, 1, 2, \dots, k_m. \end{aligned} \quad (23)$$

Здесь k_m – относительная длительность времени перехода схвата из точки M_0 в точку M_1 ; приращения Δ_{xk} , Δ_{yk} , Δ_{zk} определяются заданными траекториями пространственного движения схвата при одинаковом интервале квантования по времени Δ_t .

Электроприводы всех трех звеньев трипода идентичны, а их нагрузки мало отличаются друг от друга, поэтому задающие воздействия (22) и (23) обрабатываются соответствующими электроприводами, на которые агенты подают управления, вычисляемые ими на основе следующих, практически аналогичных алгоритмов:

$$\begin{aligned} u_{i,k} &= 0,017094u_{i,k-1} + 1,111111g_{li,k} - 1,025641g_{li,k-1} - \\ &- 6,333333l_{i,k} + 1,205128l_{i,k-1}, \quad i = 1, 2, 3, \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (24)$$

Алгоритмы действий агентов (24) построены с применением метода АССУВВ [21, 22]. При этом предполагается, что время на измерение и преобразование данных, а также на вычисление текущих значений управле-

ний $u_{i,k}$ по сравнению с периодом квантования по времени Δ_t в (23) малó, так что им можно пренебречь.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Оценка эффективности разработанного мультиагентного управления триподом осуществлялась путем моделирования на ПЭВМ. При этом рассматривался случай отработки заданных прямолинейной и параболической траекторий движения точки M (схвата) из начального положения $O_0(x_0, y_0, z_0)$, в конечное $O_1(x_1, y_1, z_1)$. Траектории задавались, естественно, так, чтобы все их точки удовлетворяли условиям (10) и (6). Расчеты и моделирование выполнялись в MATLAB применительно к триподу с параметрами $OA = 79$ см, $BC = 70$ см при $\varphi = 35^\circ$. На рис. 3–5 представлены некоторые результаты моделирования.

Схват переводится из точки O_0 с координатами $x_0 = 5$ см, $y_0 = 30$ см, $z_0 = 68$ см в точку O_1 с координатами $x_1 = 20$ см, $y_1 = 42$ см, $z_1 = 88$ см по прямолинейной траектории, а из точки O_0 с координатами $x_0 = 5$ см, $y_0 = 30$ см, $z_0 = 63$ в точку O_1 с координатами $x_1 = 25$, $y_1 = 42$ и $z_1 = 93$ см – по параболической траектории. Графики изменения задающих воздействий $g_{li}(t)$, $i = 1, 2, 3$, соответствующие (25) и (26) при $\Delta_t = 0,2$ с и $k_m = 10$, приведены на рис. 3.

На рис. 4 приведены графики изменения отклонений только переменной $z(t)$. Графики изменения отклонений переменных $x(t)$ и $y(t)$ имеют аналогичный вид. Для большей наглядности графики на рис. 4 и рис. 5 построены в отклонениях Δx , Δy и Δz от вспомогательной точки B с координатами $x_B = 0$, $y_B = 20$, $z_B = 63$ см. Соответствующие траектории в отклонениях пространственных движений схвата по прямолинейной и параболической траекториям показаны на рис. 5.

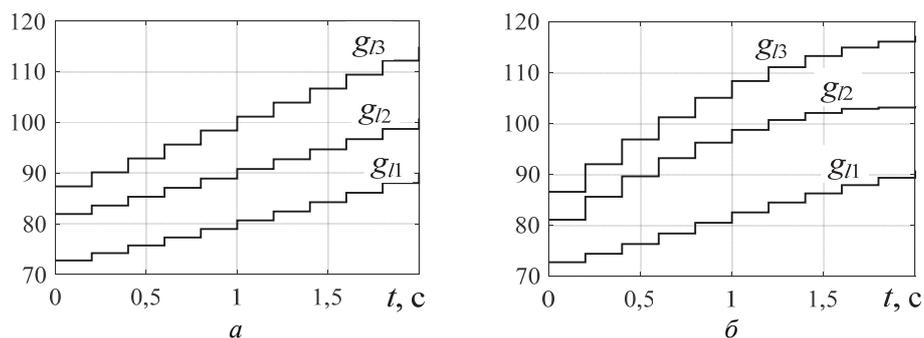


Рис. 3. Заданные изменения длин управляемых звеньев трипода

Приведенные графики свидетельствуют, что манипулятор на основе трипода под управлением предложенной в данной работе мультиагентной системы обеспечивает перемещения схвата по заданным достаточно произвольным пространственным траекториям.

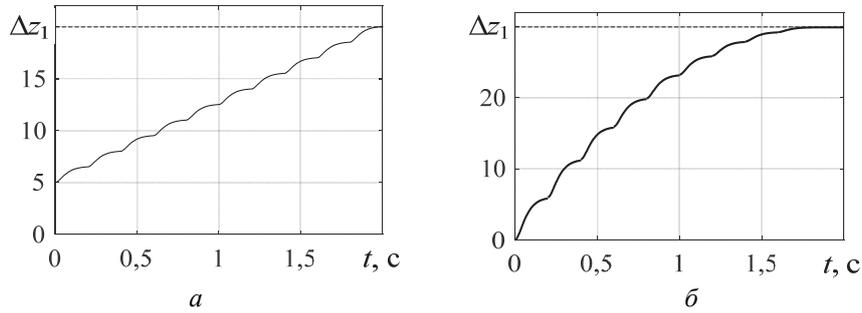


Рис. 4. Отклонения переменной $z(t)$ схвата трипода при прямолинейной (а) и параболической (б) траекториях

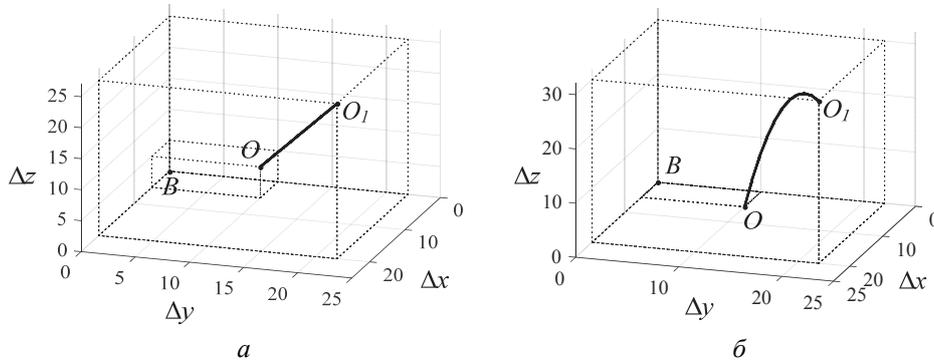


Рис. 5. Траектории движения схвата в отклонениях:
а – прямолинейная; б – параболическая

Отметим, что в приведенном примере шаг по времени Δt намеренно принят большим для наглядности процесса отработки заданных траекторий триподом под управлением мультиагентной системы. При меньших значениях шага по времени переход манипулятора из одной заданной точки в другую протекает аналогично, но с меньшими вариациями скорости движения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в данной работе метод позволяет создавать мультиагентные системы управления механизмами параллельной структуры, которые имеют несколько взаимосвязанных кинематических цепей. Для синтеза системы управления манипулятором в данной работе применены декомпозирующее управление и мультиагентный подход, что позволило существенно упростить процедуру синтеза законов управления. Методом АССУВВ построены соответствующие алгоритмы работы агентов, что позволило придать мультиагентной системе управления манипулятором параллельной структуры заданные показатели качества как в переходном, так и в установившемся режиме. Показано, что желаемые пространственные траектории движения рабочего инструмента целесообразно формировать в соответствии с необходимыми технологическими операциями.

Предложенный подход может применяться при создании систем управления механизмами параллельной структуры, предназначенными для решения различных задач промышленной, сельскохозяйственной, социальной и специальной сфер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управляющие системы промышленных роботов / Ю.Д. Андрианов, Л.Я. Глейзер, М.Б. Игнатъев и др.; под общ. ред. И.М. Макарова, В.А. Чиганова. – М.: Машиностроение, 1984. – 288 с.
2. *Craig J.J.* Introduction to robotics: mechanics and control. – Reading, MA: Addison-Wesley, 1986. – 246 p.
3. *Бурдаков С.Ф., Дьяченко В.А., Тимофеев А.Н.* Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1986. – 264 с.
4. *Егоров И.Н.* Манипуляционные исполнительные системы лазер-роботов: структуры, конструкция и управление // Мехатроника, автоматизация, управление: первая Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: труды. – М.: Новые технологии, 2004. – С. 252–253.
5. *Афанасьев Р.А., Ермолов И.Л.* Особенности роботизации агротехнологий точного земледелия // Десятая Всероссийская мультиконференция по проблемам управления: МКПУ-2017: материалы 10-й Всероссийской мультиконференции (с. Дивноморское, Геленджик, Россия, 11–16 сентября 2017 г.): в 3 т. – Ростов н/Д; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – Т. 2. – С. 18–20.
6. *Жога В.В., Покровский Д.Н., Артемов В.И.* Робототехнический комплекс малого класса экологического назначения // Мехатроника, автоматизация, управление: первая Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: труды. – М.: Новые технологии, 2004. – С. 256–258.
7. *Merlet J.-P.* Parallel robots. – Dordrecht: Springer, 2006. – P. 15–79.
8. *Герасун В.М., Несмиянов И.А.* Системы управления манипуляторами на основе пространственных исполнительных механизмов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 2. – С. 24–28.
9. *Хейло С.В., Глазунов В.А., Палочкин С.В.* Манипуляционные механизмы параллельной структуры: структурный синтез, кинематический и силовой анализ. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2011. – 153 с.
10. *Несмиянов И.А.* Особенности структурного исследования манипуляторов параллельно-последовательной структуры // Современное машиностроение: наука и образование: материалы 5-й международной научно-практической конференции / под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 715–722.
11. *Серебрянный В.В., Бошняков А.А., Овсянкин Г.И.* Оптимизация и мультипликация перемещений в механизмах параллельной кинематики // Десятая Всероссийская мультиконференция по проблемам управления: МКПУ-2017: материалы 10-й Всероссийской мультиконференции (с. Дивноморское, Геленджик, Россия, 11–16 сентября 2017 г.): в 3 т. – Ростов н/Д; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – Т. 2. – С. 51–56.
12. *Колоколова К.В., Гайдук А.Р.* Синтез систем автоматического управления неустойчивыми многомерными объектами // Научный вестник НГТУ. – 2017. – № 1 (66). – С. 26–40.
13. A fully decoupled 3-dof translational parallel mechanism / C.M. Gosselin, X. Kong, S. Foucault, I. Bonev // Parallel Kinematic Machines in Research and Practice: The 4 Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. – Chemnitz, Germany, 2004. – P. 595–610.
14. *Дячкин-Титов В.В., Павловский В.Е.* Задача оптимального управления перемещением схвата манипулятора-трипода // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. – 2014. – № 4 (36). – С. 231–236.
15. *Gaiduk A.R., Vershinin Y.A., West M.J.* Neural networks and optimization problems // Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Control Applications. – Glasgow, UK, 2002. – P. 37–41.
16. *Angeles J.* The qualitative synthesis of parallel manipulators // Journal of Mechanical Design. – 2004. – Vol. 126. – P. 617–624.

17. Kong X., Gosselin C. Type synthesis of parallel mechanisms. – Berlin; New York: Springer, 2007. – 275 p.
18. Каляев И.А., Гайдук А.Р. Стайные принципы управления в группе роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 12. – С. 29–33.
19. Капустян С.Г. Сервис-ориентированный подход к организации функционирования сетцентрической системы управления гетерогенной группой роботов при выполнении потока сложных задач // Десятая Всероссийская мультиконференция по проблемам управления: МКПУ-2017: материалы 10-й Всероссийской мультиконференции (с. Дивноморское, Геленджик, Россия, 11–16 сентября 2017 г.): в 3 т. – Ростов н/Д; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – Т. 2. – С. 285–288.
20. Станкевич Л.А. Мультиагентная технология в когнитивных системах управления автономными роботами // X научно-техническая конференции «Экстремальная робототехника»: материалы конференции. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. – С. 62–70.
21. Гайдук А.Р., Плаксиенко Е.А. Синтез динамических систем по требуемым показателям качества // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 4. – С. 7–12.
22. Гайдук А.Р., Плаксиенко Е.А. Анализ и синтез систем управления с применением системных инвариантов в MATLAB. – Saarbrücken, Deutschland: Palmarium Academic Publishing, 2016. – 128 с.
23. Гайдук А.Р. Оптимальные и адаптивные системы автоматического управления. – М.: Училиствз, 2006. – 158 с. – ISBN 5-8367-0042-X.

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-51-66

Multiagent Control by Parallel Structure Mechanisms Based on the Decoupled Approach*

A.R. GAIDUK¹, S.G. KAPUSTYAN², E.A. PLAKSIENKO³, K.V. KOLOKOLOVA⁴

¹ Southern Federal University, 44, Nekrasovskiy Lane, Taganrog, 347922; Kislovodsk Humanitarian-Technical Institute, 37a, Pobedy Prospekt, Russian Federation, D. Sc.(Eng), Prof. E-mail: gaiduk_2003@mail.ru

² Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2, Chekhov St., Taganrog, 347928, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), leading researcher; SFedU Acad. Kalyaev Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems, head of department. E-mail: kap56@mail.ru

³ Taganrog Institute of Management and Economics, 45, Petrovskaya St., Taganrog, 347900, Russian Federation, PhD, (Eng), associate professor. E-mail: pumkad@mail.ru

⁴ Southern Federal University, 44, Nekrasovskiy Lane, Taganrog, 347922; Russian Federation, assistant lecturer. E-mail: kbesklubova@mail.ru

Recently parallel structure mechanisms have been more and more often used instead of console type manipulators. These mechanisms allow achieving higher speeds, accelerations and accuracy of movements of work tools caused by such technological operations as laying-out and laser cutting of sheet materials, assembly, welding and many others. In this connection the problem of developing corresponding design methods of control becomes quite relevant. The known design methods results in rather complex control systems both from the point of view of their design and their realization. One of the challenges is taking into account the working area limitation of parallel structure mechanisms, especially when designing control optimal in terms of the square-law criteria. The design method of multiagent control for parallel structure mechanisms is suggested on the example of tripod control. Control laws and algorithms are generated on the basis of a decoupled approach and a method of analytical system design with control by output and impacts (ASDCOI). Application of this analytical method allows creating multiagent control systems for parallel structure mechanisms with the necessary quality parameters in transient and steady state modes.

* Received 22 September 2017.

In the given paper the known mathematical tripod model is used. It is shown that desirable trajectories of work tool movements should be formed based on the developed manipulator tasks. The computer simulation results confirm the efficiency of the suggested approach. The developed approach can be applied to create multiagent manipulators with parallel structure mechanisms for solving a wide scope of problems such as application of fertilizers, environmental observations, improving quality of the system machine vision, and carrying out many industrial and technological operations.

Keywords: Console manipulator, parallel structure mechanism, tripod, movement trajectory, control, system, design, decoupled approach, control by output and impacts

REFERENCES

1. Makarova I.M., Chiganova V.A., ed. *Upravlyayushchie sistemy promyshlennykh robotov* [Control systems of industrial robots]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 288 p.
2. Craig J.J. *Introduction to robotics: mechanics and control*. Reading, MA, Addison-Wesley, 1986. 246 p.
3. Burdakov S.F., D'yachenko V.A., Timofeev A.N. *Proektirovanie manipulyatorov promyshlennykh robotov i robotizirovannykh kompleksov* [Designing of industrial robots manipulators and robotized complexes]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 264 p.
4. Egorov I.N. [Manipulation service systems of laser-robots: structures, construction and control]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie: pervaya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem: trudy* [Mechatronics, automation, control: Proceedings of the First All-Russia scientific-technical conference with the international participation]. Moscow, Novye tekhnologii Publ., 2004, pp. 252–253. (In Russian).
5. Afanas'ev R.A., Ermolov I.L. [Robotization feature of exact agricultural technology]. *Desyataya Vserossiiskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya: MKPU-2017: materialy 10-i Vserossiiskoi mul'tikonferentsii* [X international multimedia conference on management: MKPU-2017: materials of the 10th international multimedia conference]. Rostov-on-Don, Taganrog, SFEDU Publ., 2017, vol. 2, pp. 18–20. (In Russian).
6. Zhoga V.V., Pokrovskii D.N., Artemov V.I. [Robototechnical complex of a small class with ecological purpose]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie: pervaya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem: trudy* [Mechatronics, automation, control: Proceedings of the First All-Russia scientific-technical conference with the international participation]. Moscow, Novye tekhnologii Publ., 2004, pp. 256–258. (In Russian).
7. Merlet J.-P. *Parallel robots*. Dordrecht, Springer, 2006, pp. 15–79.
8. Gerasun V.M., Nesmiyanov I.A. Sistemy upravleniya manipulyatorami na osnove prostanstvennykh ispolnitel'nykh mekhanizmov [Manipulators control systems on the base of spatial acting mechanisms]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*, 2010, no. 2, pp. 24–28.
9. Kheilo S.V., Glazunov V.A., Palochkin S.V. *Manipulyatsionnye mekhanizmy parallel'noi struktury: strukturnyi sintez, kinematicheskii i silovoi analiz* [Manipulation mechanisms of parallel structure: structural synthesis, kinematics and force analysis]. Moscow, MGTU namely A.N. Kosygin Publ., 2011. 153 p.
10. Nesmiyanov I.A. [Features of structural research of parallel-serial structure manipulators]. *Sovremennoe mashinostroenie: nauka i obrazovanie: materialy 5-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Modern mechanical engineering: science and education: materials of 5th international scientific-practical conference]. St. Petersburg, 2016, pp. 715–722. (In Russian).
11. Serebrennyi V.V., Boshlyakov A.A., Ovsyankin G.I. [Optimization and animated cartoon of movings in mechanisms of parallel kinematics]. *Desyataya Vserossiiskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya: MKPU-2017: materialy 10-i Vserossiiskoi mul'tikonferentsii* [X international multimedia conference on management: MKPU-2017: materials of the 10th international multimedia conference]. Rostov-on-Don, Taganrog, SFEDU Publ., 2017, vol. 2, pp. 51–56. (In Russian).
12. Kolokolova K.V., Gaiduk A.R. Sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya neustoiichivymi mnogomernymi ob'ektami [Synthesis of control systems by unstable multivariable plants]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 1 (66), pp. 26–40.

13. Gosselin C.M., Kong X., Foucault S., Bonev I. A fully decoupled 3-dof translational parallel mechanism. *Parallel Kinematic Machines in Research and Practice: The 4 Chemnitz Parallel Kinematics Seminar*. Chemnitz, Germany, 2004, pp. 595–610.
14. Dyashkin-Titov V.V., Pavlovskii V.E. Zadacha optimal'nogo upravleniya peremeshcheniem skhvata manipulyatora-tripoda [Task of optimal control of manipulator-tripod gripper moving]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie – Proceedings of Nizhnevolzhskiy agrouniversity complex: science and higher vocational education*, 2014, no. 4 (36), pp. 231–236.
15. Gaiduk A.R., Vershinin Y.A., West M.J. Neural networks and optimization problems. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Control Applications*, Glasgow, UK, 2002, pp. 37–41.
16. Angeles J. The qualitative synthesis of parallel manipulators. *Journal of Mechanical Design*, 2004, vol. 126, pp. 617–624.
17. Kong X., Gosselin C. *Type synthesis of parallel mechanisms*. Berlin, New York, Springer, 2007. 275 p.
18. Kalyaev I.A., Gaiduk A.R. Stainye printsipy upravleniya v gruppe robotov [Gregarious principles of control in robots group]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*, 2004, no. 12, pp. 29–33.
19. Kapustyan S.G. [Service-focused approach to functioning organization of network control systems of robots heterogeneous group at performance of challenges stream]. *Desyataya Vserossiiskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya: MKPU-2017: materialy 10-i Vserossiiskoi mul'tikonferentsii [X international multimedia conference on management: MKPU-2017: materials of the 10th international multimedia conference]*. Rostov-on-Don, Taganrog, SFEDU Publ., 2017, vol. 2, pp. 18–20. (In Russian).
20. Stankevich L.A. [Multiagent technology in когнитивных control systems of autonomous robots]. *X nauchno-tekhnicheskaya konferentsii "Ekstremal'naya robototekhnika": materialy konferentsii [Proceedings of the International Scientific and Technological Conference "Extreme Robotics"]*. St. Petersburg, 1999, pp. 62–70. (In Russian).
21. Gaiduk A.R., Plaksienko E.A. Sintez dinamicheskikh sistem po trebuemym pokazatelyam kachestva [Design of dynamic systems on required quality parameters]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*, 2008, no. 4, pp. 7–12.
22. Gaiduk A.R., Plaksienko E.A. *Analiz i sintez sistem upravleniya s primeneniem sistemnykh invariantov v MATLAB [Analysis and synthesis of control systems with application of system invariants in MatLab]*. Saarbrücken, Deutschland, Palmarium Academic Publishing, 2016. 128 p.
23. Gaiduk A.R. *Optimal'nye i adaptivnye sistemy avtomaticheskogo upravleniya [Optimal and adaptive automatic control systems]*. Moscow, Uchlitvuz Publ., 2006. 246 p. ISBN –5-8367-0042-X.

Для цитирования:

Мультиагентное управление механизмом параллельной структуры на основе декомпозирующего подхода / А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян, Е.А. Плаксиенко, К.В. Колоколова // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 51–66. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-51-66.

For citation:

Gaiduk A.R., Kapustyan S.G., Plaksienko E.A., Kolokolova K.V. Mul'tiagentnoe upravlenie mekhanizmom parallel'noi struktury na osnove dekompoziruyushchego podkhoda [Multiagent control by parallel structure mechanisms based on the decoupled approach]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (70), pp. 51–66. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-51-66.