

А.Н. БАЛАБАНОВ, А.Е. БЕЗУГЛАЯ, Е.А. ШУШЛЯПИН
УПРАВЛЕНИЕ МАНИПУЛЯТОРОМ ПОДВОДНОГО РОБОТА

Балабанов А.Н., Безуглая А.Е., Шушляпин Е.А. Управление манипулятором подводного робота.

Аннотация. Рассматривается задача приведения конечного эффектора (центра схвата) антропоморфного манипулятора подводного аппарата в заданное положение за заданное время с помощью метода конечного состояния. На основе полученной кинематической модели антропоморфного манипулятора, построенной на основе подхода Денавита – Хартенберга (ДН-модель), сформулирована динамическая модель, учитывающая динамику приводов сочленений. ДН-модель использована в терминальном нелинейном критерии, отображающем близость ориентации и положения эффектора к заданным значениям. Динамическая модель приспособлена для эффективного применения авторского метода конечного состояния (МКС) и представляет собой систему дифференциальных уравнений для углов поворота звеньев манипулятора вокруг продольных и поперечных осей, правые части которой содержат только искомые МКС-управления. Такая модель позволила существенно упростить расчет управлений за счет упразднения численного решения дифференциальных уравнений специального вида, необходимых в случае использования в МКС нелинейных динамических моделей общего вида. Найденные МКС-управления далее использованы в выражениях для управляющих воздействий на электроприводы сочленений, полученных на основе динамических моделей электроприводов. Предполагается, что неизвестные параметры приводов, как функции углов поворота звеньев и других неизвестных факторов, могут быть определены экспериментально. Такая двухэтапная процедура позволила получить управление приводами в форме алгебраических и трансцендентных выражений. Наконец, представлены результаты моделирования процессов приведения конечного эффектора манипулятора в заданные положения на границах рабочей области с помощью разработанного программного обеспечения. Полученная при этом погрешность без учета погрешности измерений составила величины, не превышающие двух сантиметров на максимальном вылете руки длиной 1,2 метра. Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы по разработке роботизированного аппарата, предназначенного для подводных исследовательских работ на малых глубинах (до 10 метров).

Ключевые слова: подводный исследовательский аппарат, антропоморфный манипулятор, нелинейная система, метод конечного состояния, терминальное управление, кинематическая модель Денавита-Хартенберга, динамическая модель манипулятора.

1. Введение. В настоящее время имеет место применение антропоморфных манипуляторных роботов. В сочетании с технологиями искусственного интеллекта эти роботы позволяют выполнять манипуляторные операции, заменяющие человека в условиях неблагоприятной окружающей среды. Подводные манипуляторы представляют часть обширного семейства промышленных роботов. Они устанавливаются на обитаемых и необитаемых подводных аппаратах, самоподъемных платформах, устьевом оборудовании морских скважин. Благо-

даря сочетанию функций манипулятора и подводного аппарата появилось понятие подводного аппарата-робота (ПАР). При этом большинство ПАР имеют как минимум один манипулятор. Проблема автоматизации различных подводно-технических работ, труднодоступность и существующие при этом опасности для человека дали толчок к решению задачи автоматической ориентации (манипулирования) рабочего органа, изделия или инструмента. Большинство операций, выполняемых ПАР под водой, осуществляется с помощью систем управления с удаленным доступом (85% по данным MarketsandMarkets [1]). Вместе с тем сложное подводное окружение и характер решаемых задач требуют совершенствования системы управления ПАР в плане повышения степени ее интеллектуальности. В связи с этим ведутся интенсивные исследования и разработки, направленные на повышение степени автономности ПАР [2-4]. Используемые при этом методы основываются на современных технологиях, предложенных в работах по техническому зрению, навигации и управлению.

Одно из таких исследований выполняется авторами настоящей статьи в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», мероприятие 1.3 «Разработка и исследование робототехнического комплекса для выполнения подводно-технических работ в условиях ограниченной видимости с использованием комплексной системы 3D зрения высокого разрешения». Разрабатываемый роботизированный аппарат предназначен для подводных исследовательских работ на малых глубинах (до 10 метров) и должен обеспечивать достигаемую точность по положению до 5 сантиметров.

Частной задачей, решаемой в статье, является разработка метода управления приводами манипулятора, обеспечивающего заданную точность и учитывающем динамику приводов.

Предварительные исследования [5, 6] проводились с использованием реального робота SAR-400, являющегося одним из этапных проектов в разработке отечественного антропоморфного робота FEDOR [7]. В отчете [5] подробно рассматриваются существующие подходы к построению манипуляторов различного типа, в том числе подводных. В [8 -11] рассмотрены различные конструкции ПАР, в работах [6, 12-25] – методы управления. Для решения задачи управления движением конечного эффектора манипулятора традиционно используются методы математического программирования. Например, в [6] для управления роботом SAR-400 использован метод Бройдена – Флетчера –Голдфарба – Шенно, реализованный в модуле расширений

Robotics System Toolbox пакета Matlab. Используются также методы на основе нечетких систем управления [12, 17, 24], муравьиный алгоритм [21, 24], предиктивные регуляторы [18], генетические алгоритмы [19, 20, 22, 23], нейронные сети [25], другие методы решения обратной задачи кинематики [13-16]. В работе [26] приведены результаты компьютерного моделирования робота SAR-400, управляемого посредством разработанного алгоритма терминального управления методом конечного состояния (МКС-управления). В настоящей работе этот же метод применен к модели антропоморфного манипулятора (АМ) проектируемого подводного аппарата.

2. Построение кинематической и динамической моделей антропоморфного манипулятора. Возможный внешний вид антропоморфного манипулятора (АМ) и кинематическая схема показаны на рисунках 1а, 1б.

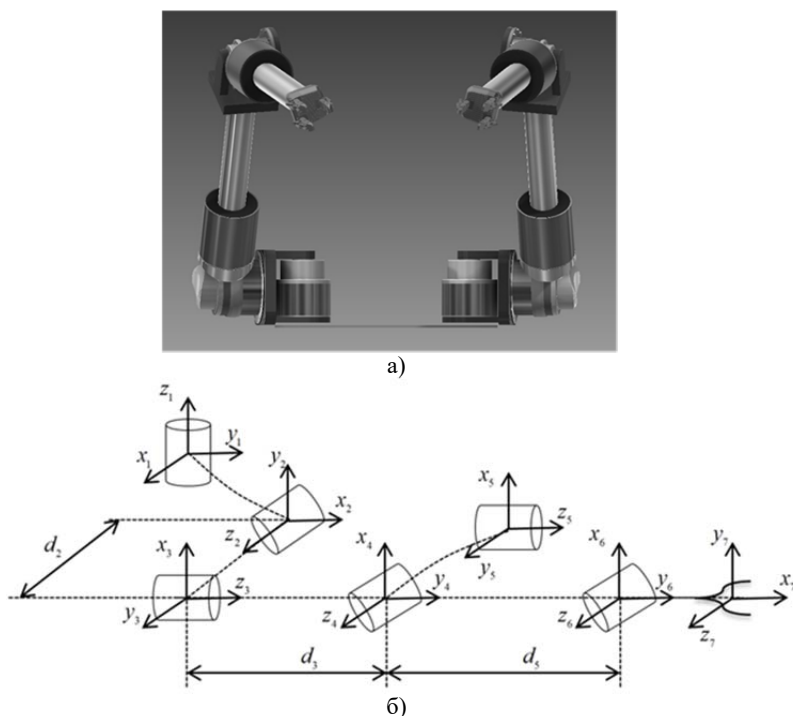


Рис. 1. Рука антропоморфного манипулятора: а) внешний вид; б) кинематическая схема

На рисунке 1б обозначены семь кинематических пар (КП) с соответствующими системами координат. При этом i -я КП вращается вокруг оси z_i , $i = 1, \dots, 7$. Из схемы рисунка 1б видно, что пары с номерами 2, 4, 6 осуществляют повороты соответствующих звеньев вокруг осей, перпендикулярных продольным осям звеньев. Пары же с номерами 1, 3, 5 осуществляют ротацию звеньев вокруг своих осей. Система координат (x_7, y_7, z_7) соответствует схвату АМ, который в данной работе не рассматривается. Длины звеньев предполагаются равными $d_2 = 100\text{мм}$, $d_3 = 700\text{мм}$, $d_5 = 500\text{мм}$.

Ниже приведена кинематическая модель АМ, совпадающая с точностью до значений параметров с моделью АМ робота SAR-400 [26] и построенная методом Денавита – Хартерберга [27], где используются угловые и линейные параметры $\theta_i, d_i, r_i, \alpha_i$, $i = 1, \dots, 6$:

В таблице 1 приведены параметры Денавита – Хартерберга звеньев.

Таблица 1. Параметры Денавита – Хартерберга для руки без схвата

Звено, i	r_i (м)	α_i (град)	d_i (м)	θ_i (град)
1	0	90	0	90
2	0	90	0,1	90
3	0	-90	0,7	0
4	0	90	0	0
5	0	-90	0,5	0
6	0,2	0	0	-90

Согласно подходу Денавита – Хартерберга, для каждого i -го звена используется матрица преобразования:

$$A_i(\theta_i) = \begin{pmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & r_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & r_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_{xi} & o_{xi} & a_{xi} & p_{xi} \\ n_{yi} & o_{yi} & a_{yi} & p_{yi} \\ n_{zi} & o_{zi} & a_{zi} & p_{zi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

а матрица преобразований от базовой системы координат до системы координат конечного эффектора равна:

$$A(\theta) = \prod_{i=1}^6 A_i(\theta_i) = \begin{pmatrix} \bar{n}_n & \bar{o}_n & \bar{a}_n & \bar{p}_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где матрица $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})$ – матрица текущего состояния; C, S являются сокращенными обозначениями косинуса и синуса. Для конечного эффектора трехкомпонентные векторы $\bar{\mathbf{n}}_n, \bar{\mathbf{o}}_n, \bar{\mathbf{a}}_n$ – единичные векторы системы координат конечного эффектора; $\bar{\mathbf{p}}_n$ – вектор положения начала системы координат конечного эффектора относительно исходной (базовой) системы координат.

Решается задача приведения конечного эффектора АМ (в данном случае конца звена (6, 7) длиной 0,2 м) в заданное положение за заданное время с помощью метода конечного состояния [28]. С помощью предлагаемого метода можно подвести эффектор в заданное положение, а затем уже решать задачу захвата предмета (например, археологического артефакта). При этом в разрабатываемом ПАР предполагается использование в качестве измерителей стереовидеокамеры с функциями распознавания, а также датчиков состояния манипулятора и расстояния до выбранного предмета. Предполагаемые максимальное и минимальное расстояния, достигаемые манипулятором, 1,2 м и 0,25 м соответственно, максимальная масса груза – 6 кг.

Задавая матрицу

$$\mathbf{T}(\bar{\mathbf{n}}_n^*, \bar{\mathbf{o}}_n^*, \bar{\mathbf{a}}_n^*, \bar{\mathbf{p}}_n^*) = \begin{pmatrix} n_{xn}^* & o_{xn}^* & a_{xn}^* & p_{xn}^* \\ n_{yn}^* & o_{yn}^* & a_{yn}^* & p_{yn}^* \\ n_{zn}^* & o_{zn}^* & a_{zn}^* & p_{zn}^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{n}}_n^* & \bar{\mathbf{o}}_n^* & \bar{\mathbf{a}}_n^* & \bar{\mathbf{p}}_n^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

определяющую положение конечного эффектора, оптимизационную задачу можно сформулировать как:

$$\|\Delta(\boldsymbol{\theta}(t_f))\| \rightarrow \min, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta(\boldsymbol{\theta}(t)) &= \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}(t)) - \mathbf{T}(\bar{\mathbf{n}}_n^*, \bar{\mathbf{o}}_n^*, \bar{\mathbf{a}}_n^*, \bar{\mathbf{p}}_n^*) = \\ &= \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{n}}_n - \bar{\mathbf{n}}_n^* & \bar{\mathbf{o}}_n - \bar{\mathbf{o}}_n^* & \bar{\mathbf{a}}_n - \bar{\mathbf{a}}_n^* & \bar{\mathbf{p}}_n - \bar{\mathbf{p}}_n^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_{\bar{\mathbf{n}}} & \Delta_{\bar{\mathbf{o}}} & \Delta_{\bar{\mathbf{a}}} & \Delta_{\bar{\mathbf{p}}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, вектор оптимизируемых параметров имеет структуру $\boldsymbol{\theta} = \{\theta_i\}, i = 1, \dots, 6$. А задачу управления можно сформули-

ровать как задачу приведения руки манипулятора из состояния $\theta(0)$ в заданное состояние $\theta(t_f)$.

Традиционный подход к расчету управлений, ориентированный на кинематические модели, имеет некоторые недостатки: неприменимость к динамическим моделям, учитывающим инерционность приводов сочленений; при программном управлении не используются обратные связи о текущих значениях углов θ_i ; необходимость наличия программного обеспечения для надежного решения задач математического программирования.

По этим причинам предлагается определять углы θ_i как функции времени и состояния на основе динамической модели антропоморфного робота, используя авторский метод конечного состояния [28].

Для применения метода конечного состояния, прежде всего, сформулируем терминальный критерий, отображающий подход фактора к некоторому заданному моменту времени t_f в заданное положение.

Вместо матрицы ошибок Δ введем вектор-столбец ошибок:

$$\delta = [\Delta_{11}, \Delta_{12}, \Delta_{13}, \Delta_{14}, \Delta_{21}, \Delta_{22}, \Delta_{23}, \Delta_{24}, \Delta_{31}, \Delta_{32}, \Delta_{33}, \Delta_{34}, \Delta_{41}, \Delta_{42}, \Delta_{43}, \Delta_{44}]^T, \quad (4)$$

а цель управления выберем в виде терминального критерия:

$$J(\theta(t_f)) = \delta(\theta(t_f))^T F \delta(\theta(t_f)) = \sum_{j=1}^{12} F_j \delta_j^2(\theta(t_f)) \rightarrow J^*, \quad (5)$$

где F – матрица весовых коэффициентов критерия; J^* – желаемое значение показателя. При точном приведении робота к $T(\bar{p}_n^*, \bar{o}_n^*, \bar{a}_n^*, \bar{p}_n^*)$ значение J^* равно нулю.

Для решения задачи управления предлагаемым методом первоначально сформируем динамическую модель робота в виде, удобном для применения МКС, с управлениями $u_i \equiv \theta_i$:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_i(t)}{dt} &= u_i, \quad i = 1, \dots, 6, \\ t \in [t_0, t_f], \quad \theta_i(t_0) &= \theta_i^0. \end{aligned} \quad (6)$$

Начальные условия θ_i^0 соответствуют начальному положению робота.

Критерий (5), по виду квадратичный, на самом деле нелинейный более сложного вида, ввиду трансцендентных зависимостей $A_i(\theta)$ (1). По этой причине для решения задачи (5, 6) нельзя использовать методы оптимального управления для линейных систем.

Данная модель пока не учитывает динамику приводов сочленений, и ниже будет дополнена соответствующими уравнениями. Это связано с особенностями метода конечного состояния, который используется для решения поставленной задачи.

В критерии (5), согласно выражениям (3-4), необходимо также задать матрицу $T(\vec{p}_n^*, \vec{o}_n^*, \vec{a}_n^*, \vec{r}_n^*)$, которая определяется через заданные конечные ориентацию и положения руки АМ.

3. Учет динамики приводов сочленений. Получим управление при учете динамики приводов сочленений, когда вместо (6) в модели используются уравнения динамики приводов в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_i}{dt} &= \omega_i \\ \frac{d\omega_i}{dt} &= \frac{1}{J_i(\theta)} (M_{di} - M_{ci}(\theta)). \end{aligned} \quad (7)$$

В уравнениях (7), ω_i – угловая скорость ротора привода i -й кинематической пары; J_i – приведенный момент инерции для i -й пары; M_{di} и M_{ci} – моменты движущих сил и сопротивления i -й пары соответственно. В случае приводов, реализованных на электродвигателях постоянного тока с постоянным возбуждением, без учета быстрых процессов в его обмотках, можно принять для малых угловых скоростей:

$$\begin{aligned} M_{di} &= k_{di} U_{Ai}, \\ M_{ci}(\theta) &= k_{ci} \omega_i + M_{gi}(\theta). \end{aligned}$$

Здесь использована упрощенная модель привода, учитывающая только механическую инерцию, ввиду чего момент движущих сил зависит от якорного напряжения, а не тока.

В последних выражениях k_{di}, k_{ci} – конструктивные параметры. Составляющие момента сопротивления – от вязкого трения $k_{ci}\omega_i$ и от веса $M_{gi}(\theta)$ тех частей АМ, которые вращает данный электропривод. Например, электропривод КП в основании АМ вращает все его три звена, а электропривод звена схвата – только одно звено. При этом этот момент сопротивления зависит от углов $\theta = \{\theta_i\}, i = 1, \dots, 6$. Если эти углы таковы, что вращение всей конструкции происходит в горизонтальной плоскости, то соответствующий момент $M_{gi}(\theta)$ равен нулю. Если же вращение конструкции происходит в вертикальной плоскости, то соответствующий момент будет равен произведению массы конструкции на плечо, равное расстоянию от вала двигателя до центра тяжести конструкции. От углов θ_i зависят и моменты инерции $J_i(\theta)$. Указанные зависимости от θ можно рассчитать аналитически как функции компонент вектора θ и подставить в выражения для якорных напряжений электропривода, которые получены ниже. Однако, на наш взгляд, целесообразно получить указанные зависимости экспериментально, например, в виде соответствующих регрессионных моделей или нейронных сетей, где помимо θ_i можно учесть и другие значимые факторы, например, температуру и плотность воды. Это особенно имеет смысл для рассматриваемого подводного робота, поскольку при движении достаточно «толстых» рук манипулятора (рисунок 1а) в воде моменты инерции и сопротивления зависят от присоединенных масс воды.

В данном случае управляющими воздействиями являются якорные напряжения U_{Ai} . Имея в виду, что угловые скорости ω_i являются одновременно компонентами МКС-управления u_i , выразим искомые управления U_{Ai} через $\omega_i \equiv u_i$. Получаем:

$$U_{Ai} = \frac{1}{k_{di}} \left(J_i(\theta) \frac{du_i}{dt} + k_{ci}u_i + M_{gi}(\theta) \right). \quad (8)$$

Для определения (8) необходимы измерения элементов вектора θ и угловых ускорений приводов $\frac{du_i}{dt}$. Однако, ввиду того, что МКС-управления имеют алгебраический вид, производная МКС-

управления $\frac{du_i}{dt}$ может быть получена в виде аналитического выражения, что показано ниже.

4. Основные расчетные соотношения метода конечного состояния. Метод конечного состояния [28], относящийся к классу методов для решения обратной задачи динамики, разработан для решения задач терминального управления нелинейными аффинными системами с гладкими функциями в критерии и динамическими ограничениями разного рода (дифференциальными, дифференциальными с запаздываниями, конечно-разностными и др.). Для рассматриваемых условий постановка задачи управления имеет вид:

$$\begin{aligned} J &= J(\mathbf{z}(t_f)) \rightarrow J^*, \\ \frac{dz(t)}{dt} &= \mathbf{\Phi}(t, z(t)) + \mathbf{B}(t, z(t)) \cdot \mathbf{u}(t), \\ t \in [t_0, t_f], \mathbf{z}(t_0) &= \mathbf{z}^0, \end{aligned} \quad (9)$$

где \mathbf{z} – вектор состояния; $J(\mathbf{z}(t_f))$ – непрерывная и дифференцируемая целевая функция терминального критерия с заданным значением J^* ; $\mathbf{\Phi}$ и \mathbf{B} – в общем случае нелинейные функции времени t и текущего состояния $\mathbf{z}(t)$; \mathbf{z}^0 – заданное начальное состояние. При этом $\mathbf{\Phi}$ – дифференцируемая функция.

В рассматриваемом методе управление рассчитывается по выражениям:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(t, \mathbf{z}(t)) &= \mathbf{G}^+ \cdot f_J, \\ \mathbf{G}^+ &= \mathbf{G}^T (\mathbf{G} \mathbf{G}^T)^{-1}, \\ \mathbf{G} &= \left. \frac{\partial J(\mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}} \right|_{\mathbf{z}=\hat{\mathbf{z}}(t_f, t, \mathbf{z}(t))} \cdot \mathbf{W}(t_f, t, \mathbf{z}(t)) \mathbf{B}(t, \mathbf{z}(t)), \end{aligned} \quad (10)$$

где $f_J = (J^* - J(\hat{\mathbf{z}}(t_f, t, \mathbf{z}(t)))) / T_u$ – правая часть дифференциального уравнения $\frac{dJ}{dt} = \frac{J^* - J}{T_u}$, которое задает желаемое экспоненциальное с постоянной времени T_u приближение критериальной функции (КФ)

$J(\hat{\mathbf{z}}(t_f, t, \mathbf{z}(t)))$ времени t к значению J^* , что имеет место при достаточно малом $T_u \ll t_f$. Можно задавать и другие формы КФ. Например, при переменном во времени $T_u = t_f - t$ форма линии, по которой КФ «приближается» к J^* , уже не экспонента, а прямая. Для экспоненциальной формы характерно, что при ее использовании управление формируется таким образом, что достижение заданного значения J^* происходит с регулируемой параметром T_u скоростью. Следует отметить, что реализация желаемой формы КФ не всегда возможна, что происходит, в частности, при недостижимой заданной цели управления. Отклонение теоретической и фактической форм КФ происходит также, когда на управление вида (11) накладываются амплитудные ограничения. В этом случае цель управления может быть достигнута, однако форма фактической КФ будет отклоняться от заданной.

В выражениях (10) используются переменные конечного состояния (ПКС) $\hat{\mathbf{z}}$ и нелинейная переходная матрица (ПМ) В.М. Алексеева [29] \mathbf{W} , определяемая совместной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\mathbf{z}}(\mathcal{G}, t, \mathbf{z}(t))}{d\mathcal{G}} &= \mathbf{\Phi}(\mathcal{G}, \hat{\mathbf{z}}), \\ \frac{d\mathbf{W}(\mathcal{G}, t, \mathbf{z}(t))}{d\mathcal{G}} &= \left. \frac{\partial \mathbf{\Phi}(\mathcal{G}, \mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}} \right|_{\mathbf{z}=\hat{\mathbf{z}}(\mathcal{G}, t, \mathbf{z}(t))} \cdot \mathbf{W}, \\ \mathcal{G} \in [t, t_f], \hat{\mathbf{z}}(t, \mathbf{z}(t)) &= \mathbf{z}(t), \mathbf{W}(t, \mathbf{z}(t)) = \mathbf{I}, \end{aligned} \quad (11)$$

где \mathbf{I} – единичная матрица.

Заметим, что ПКС и ПМ в (10) нужны как функции второго аргумента t , а по (11) они определяются как функции первого аргумента \mathcal{G} для каждого из значений t . По этой причине в общем случае для расчета МКС-управления в каждый момент времени t необходимо интегрировать систему (11) на скользящем интервале $\mathcal{G} \in [t, t_f]$.

5. Применение МКС для управления манипулятором.

Напомним, что согласно постановке задачи (5, 6), вектор состояния $\mathbf{z} \equiv \boldsymbol{\theta}$, матрица $\mathbf{\Phi} = 0$, а матрица \mathbf{B} – единичная. Для случая $\mathbf{\Phi} = 0$, который имел место и в других решенных авторами задачах [26, 30, 31], можно провести ряд упрощений вычислительных процедур метода

конечного состояния. В итоге имеем следующие выражения для составляющих управления:

$$\begin{aligned}
 \hat{\mathbf{z}}(\vartheta, t, \mathbf{z}(t)) &= \mathbf{z}(t) \equiv \boldsymbol{\theta}(t), \mathbf{W}(\vartheta, t, \mathbf{z}(t)) = \mathbf{I} \quad \forall t \in [t, t_f] \\
 J(\mathbf{z}(t)) &= J(\boldsymbol{\theta}(t)) = \sum_{j=1}^{12} F_j \delta_j^2(\boldsymbol{\theta}(t)), \\
 \mathbf{G} &= \frac{\partial \sum_{j=1}^{12} F_j \delta_j^2(\boldsymbol{\theta}(t))}{\partial \boldsymbol{\theta}} \Bigg|_{\boldsymbol{\theta}=\boldsymbol{\theta}(t)} \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{I} \equiv \frac{\partial \sum_{j=1}^{12} F_j \delta_j^2(\boldsymbol{\theta}(t))}{\partial \boldsymbol{\theta}} \Bigg|_{\boldsymbol{\theta}=\boldsymbol{\theta}(t)} = \quad (12) \\
 &= 2 \sum_{j=1}^{12} F_j \delta_j(\boldsymbol{\theta}(t)) \frac{\partial \delta_j(\boldsymbol{\theta}(t))}{\partial \boldsymbol{\theta}}.
 \end{aligned}$$

При получении выражения для матрицы \mathbf{G} размерности (6×1) (число 6 – от числа кинематических пар) учтено, что матрицы \mathbf{W} и \mathbf{V} – единичные (обозначены \mathbf{I}), вектор переменных конечного состояния $\hat{\mathbf{z}}$ равен текущим значениям вектора состояния, в данном случае $\boldsymbol{\theta}(t)$, из-за $\Phi = 0$ (см. (11)).

Таким образом:

$$G_i = 2 \sum_{j=1}^{12} F_j \delta_j(\boldsymbol{\theta}(t)) \frac{\partial \delta_j(\boldsymbol{\theta}(t))}{\partial \theta_i}, i = 1, \dots, 6. \quad (13)$$

Определим составляющие выражения (13). Для определения $\frac{\partial \delta_j(\boldsymbol{\theta}(t))}{\partial \theta_i}$ воспользуемся (4), определив соотношение между индексом j вектора $\boldsymbol{\delta}$ и индексами ошибки Δ_{ks} , которое имеет вид:

$$j = k + 3(s-1).$$

Смысл последнего выражения в том, что, к примеру, Δ_{23} , то есть Δ_{ks} при $k=2, s=3$ соответствует восьмому элементу вектора δ .

Дифференцируя $\Delta(t)$ по θ_i имеем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta(t)}{\partial \theta_i} &= \frac{\partial}{\partial \theta_i} \left(\prod_{l=1}^6 \mathbf{A}_l(\theta_l(t)) \right) = \\ &= \mathbf{A}_1(\theta_1) \times \dots \times \mathbf{A}_{i-1}(\theta_{i-1}) \times \frac{\partial \mathbf{A}_i(\theta_i)}{\partial \theta_i} \times \mathbf{A}_{i+1}(\theta_{i+1}) \times \dots \times \mathbf{A}_6(\theta_6). \end{aligned}$$

В итоге имеем: $\frac{\partial \delta_j}{\partial \theta_i} = \frac{\partial \Delta_{ji}}{\partial \theta_i}$.

Получим производную по времени от управления (10), которое требуется для расчета якорного напряжения по выражению (8) для случая, когда в качестве приводов сочленений используются электроприводы постоянного тока с постоянным возбуждением. Учитывая $\dim \theta = (6 \times 1)$, $\dim \mathbf{G} = (1 \times 6)$, $\dim f_J = (1 \times 1)$, получаем:

$$\dim \mathbf{G}^+ = \dim \left(\mathbf{G}^T (\mathbf{G} \mathbf{G}^T)^{-1} \right) = (6 \times 1)(1 \times 6)(6 \times 1) = (6 \times 1),$$

$$\dim \left(\frac{\partial \mathbf{G}^+(\theta)}{\partial \theta} \right) = (6 \times 6), \dim \left(\frac{\partial f_J(\theta)}{\partial \theta} \right) = (1 \times 6), \dim \left(\frac{\partial \mathbf{G}^T}{\partial \theta} \right) = (6 \times 6).$$

Тогда:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{u}(t)}{dt} &= \frac{\partial \mathbf{G}^+(\theta)}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} f_J(t) + \mathbf{G}^+(\theta) \cdot \frac{\partial f_J(\theta)}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} = \\ &= \left(-\frac{\partial \mathbf{G}^+}{\partial \theta} \cdot \frac{J^* - J}{T_u} - \mathbf{G}^+ \cdot \frac{1}{T_u} \cdot \frac{\partial J}{\partial \theta} \right) \mathbf{u}. \end{aligned}$$

Окончательное выражение для якорного напряжения с моделью привода (7) получает вид:

$$\begin{aligned} U_{Ai} = \\ = \frac{1}{k_{di}} \left(\left(J_i(\theta) \left(\left(-\frac{\partial \mathbf{G}^+}{\partial \theta} \cdot \frac{J^* - J}{T_u} - \mathbf{G}^+ \cdot \frac{1}{T_u} \cdot \frac{\partial J}{\partial \theta} \right) \right) + k_{ci} \right) u_i + M_{g_i}(\theta) \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Выражения для производных могут быть получены на основе (10), (13) и имеют вид:

$$\frac{\partial \mathbf{G}^+(\boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \begin{pmatrix} a_1 \frac{\partial G_1}{\partial \theta_1} & \dots & a_6 \frac{\partial G_1}{\partial \theta_6} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_1 \frac{\partial G_6}{\partial \theta_1} & \dots & a_6 \frac{\partial G_6}{\partial \theta_6} \end{pmatrix} + \frac{1}{G_1^2 + \dots + G_6^2} \begin{pmatrix} \frac{\partial G_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial G_1}{\partial \theta_6} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial G_6}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial G_6}{\partial \theta_6} \end{pmatrix},$$

$$a_i = 2 \sum_{j=1}^6 G_j \frac{\partial G_j}{\partial \theta_i},$$

$$\frac{\partial G_i}{\partial \theta_j} = 2 \sum_{k=1}^{12} F_k \frac{\partial^2 \delta_k(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j \partial \theta_i} (1 + \delta_k(\boldsymbol{\theta})),$$

$$G_i = 2 \sum_{j=1}^{12} F_j \delta_j(\boldsymbol{\theta}(t)) \left(\mathbf{A}_1 \times \dots \times \mathbf{A}_{i-1} \times \frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial \theta_i} \times \mathbf{A}_{i+1} \times \dots \times \mathbf{A}_6 \right)_{ji},$$

$$\frac{\partial^2 \delta_k(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j \partial \theta_i} = \frac{\partial}{\partial \theta_j} \left(\mathbf{A}_1 \times \dots \times \mathbf{A}_{k-1} \times \frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial \theta_i} \times \mathbf{A}_{k+1} \times \dots \times \mathbf{A}_6 \right)_{ki} =$$

$$= \begin{cases} \left(\mathbf{A}_1 \times \dots \times \mathbf{A}_{j-1} \times \frac{\partial \mathbf{A}_j}{\partial \theta_j} \times \dots \times \mathbf{A}_{j+1} \times \dots \times \mathbf{A}_{i-1} \times \frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial \theta_i} \times \mathbf{A}_{i+1} \times \dots \times \mathbf{A}_6 \right)_{ki}, & i \neq j, \\ \left(\mathbf{A}_1 \times \dots \times \mathbf{A}_{i-1} \times \frac{\partial^2 \mathbf{A}_i(\theta_i)}{(\partial \theta_i)^2} \times \mathbf{A}_{i+1} \times \dots \times \mathbf{A}_6 \right)_{ki}, & i = j, \end{cases}$$

$$i, j = 1, \dots, 6.$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_i} = \sum_{j=1}^{12} 2F_j \left(\mathbf{A}_1 \times \dots \times \mathbf{A}_{i-1} \times \frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial \theta_i} \times \mathbf{A}_{i+1} \times \dots \times \mathbf{A}_6 \right)_{ji}.$$

Таким образом, управляющее воздействия в форме алгебраических и трансцендентных выражений, где трансцендентность скрыта в зависимостях \mathbf{A}_i от тригонометрических функций (см. (1)). Напомним, что управления u_i являются МКС-управлениями (10 – 13). Если вычислительные возможности управляющего компьютера ограничены и не способны в реальном времени рассчитывать полученное управление с учетом конкретизированных аналитических выражений для производных, то остается возможность использования формулы (8), пред-

полагающей наличие измерителей угловых ускорений роторов приводов. Заметим, что при вычислении управлений u_i и U_{Ai} наиболее трудоемкими составляющими являются те, где рассчитываются произведения матриц A_i с вкраплениями на соответствующих местах $\partial A_i / \partial \theta_i$ или $\partial^2 A_i(\theta_i) / (\partial \theta_i)^2$. При этом существует возможность рационализации вычислений за счет многократного использования частичных произведений матриц A_i :

$$A_1, A_1 A_2, \dots, A_1 A_2 A_3 A_4 A_5, A_6, A_5 A_6, \dots, A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 .$$

Указанные частичные произведения рассчитываются один раз на каждом временном шаге, сохраняются в памяти, и используются при вычислении приведенных выше выражений.

6. Результаты моделирования. Для тестирования предложенного подхода к построению управления АМ разработана программа и выполнено компьютерное моделирование управления АМ u_i модели (6) в виде МКС-управления (10-13).

В качестве целей управления выбраны следующие: 1) приведение эффектора в точки П1, П2, удаленные от основания АМ на максимальное/минимальное расстояния 1,2м/0,25м вперед; 2) приведение АМ в точки П3 (+), П4 (-) на границах сектора $\pm 60^\circ$ и заданным максимальным радиусом 1,2 м; 3) приведение АМ в точки П5 (+), П6 (-) на границах сектора $\pm 60^\circ$ и заданным минимальным радиусом 0,25м; 4) приведение АМ в точку П7 с произвольными (в допустимой области) параметрами ориентации и положения.

Результаты моделирования приведены ниже для следующих параметров модели: начальные условия $\theta|_{t=0} = (0 \quad 90^\circ \quad 0 \quad 65^\circ \quad 0 \quad 0)$; $T_u = 0,01c$; время моделирования $t_f = 1c$; $F = I$; $J^* = 0$.

Вначале приведем сравнительные значения определенных выше целевых матриц $T(\bar{n}_n^*, \bar{o}_n^*, \bar{a}_n^*, \bar{p}_n^*)$ и матриц $P = A(\theta(t_f)) = \prod_{i=1}^6 A_i(\theta_i(t_f))$, показывающих достигнутые конечные ориентацию и положение.

Для точки П1 получено:

$$T = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1,038 \\ 1 & 0 & 0 & 0,6 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, P = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1,0379 \\ 1 & 0 & 0 & 0,6 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для точки П2 получено:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0,9515 \\ 1 & 0 & 0 & -0,55 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{P} = \begin{pmatrix} -0,0008 & 1 & 0 & 0,9445 \\ 1 & 0,0008 & 0 & -0,5425 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для точки П3 с расстоянием $R = 1,2$ м на границе сектора +60 градусов вначале вычислим расстояния по осям x, y . Получим при $R = 1,2$:

$$y = R \cdot \cos 60^\circ = \frac{R}{2} = 0,6;$$

$$x = \sqrt{R^2 - y^2} = \sqrt{R^2 - \left(\frac{R}{2}\right)^2} = \frac{R}{2}\sqrt{3} = 0,6 \cdot 1,73 = 1,038.$$

Тогда для точки П3 получаем:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1,038 \\ 1 & 0 & 0 & 0,6 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1,0379 \\ 1 & 0 & 0 & 0,6 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для точки П4 с расстоянием $R = 1,2$ м получены относительно большие погрешности позиционирования (5 – 10 см). Поэтому расстояние R было уменьшено на 0,1 м, и для $y = -\frac{1,1}{2} = -0,55$; $x = 0,55 \cdot 1,73 = 0,9515$ получено:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0,9515 \\ 1 & 0 & 0 & -0,55 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{P} = \begin{pmatrix} -0,0008 & 1 & 0 & 0,9445 \\ 1 & 0,0008 & 0 & -0,5425 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для точки П5 с расстоянием $R = 0,25$ м на границе сектора +60 градусов при $x = 0,125 \cdot 1,73 = 0,2163$, $y = 0,125$ получено:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0,2163 \\ 1 & 0 & 0 & 0,125 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{P} = \begin{pmatrix} -0,0008 & 1 & -0,0006 & 0,2133 \\ 1 & 0,0008 & -0,0004 & 0,1272 \\ -0,0004 & -0,0006 & -1 & 0,0035 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для точки П6 с расстоянием $R = 0,25$ м на границе сектора -60 градусов при $x = 0,125 \cdot 1,73 = 0,2163$, $y = -0,125$ получено:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0,2163 \\ 1 & 0 & 0 & -0,125 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0,2162 \\ 1 & 0 & 0 & -0,125 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для точки П7 со случайными в допустимых диапазонах значениях элементов матрицы \mathbf{T} получено:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} -0,0933 & -0,9616 & 0,2581 & 0,7265 \\ 0,9728 & -0,1432 & -0,1819 & -0,0822 \\ 0,2119 & 0,2341 & 0,9488 & -0,6157 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} -0,0933 & -0,9616 & 0,2581 & 0,7266 \\ 0,9728 & -0,1432 & -0,1819 & -0,0822 \\ 0,2119 & 0,2341 & 0,9488 & -0,6159 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

При задании параметров ориентации в левой угловой подматрице размерности 3×3 , то есть матрице поворота, следует иметь в виду, что указанные параметры не могут выбираться произвольно. Так, вектор-столбцы матрицы поворота должны по норме быть равны единицам, а углы между векторами должны быть прямыми, образующими правую систему координат. Таким образом, из девяти элементов матрицы поворота, независимыми являются только три. Следовательно, матричная система уравнений $\mathbf{P} = \mathbf{T}$, формально содержащая 16 уравнений (из них 4 тождества) с 6-ю неизвестными, на самом деле содержит всего 6 независимых уравнений ввиду наличия связей между элементами матрицы поворота – трех связей для норм и трех связей, определяющих ортогональности трех пар векторов. Это определяет единственность решения системы $\mathbf{P} = \mathbf{T}$, если якобиан этой системы

является неособой матрицей. В противном случае решение не единственно.

При формировании матрицы T для точки П7 использовалось ДН-преобразование $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) = \prod_{i=1}^6 \mathbf{A}_i(\theta_i) = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{n}}_n & \bar{\mathbf{o}}_n & \bar{\mathbf{a}}_n & \bar{\mathbf{p}}_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ при случайно выбранных значениях θ_i . При применении МКС для решения обратной задачи получается одно из возможных решений, если их много.

На рисунках 2 и 3 показаны графики зависимостей от времени t КФ $J(\boldsymbol{\theta}(t)) = \sum_{j=1}^{12} F_j \delta_j^2(\boldsymbol{\theta}(t))$ и углов $\boldsymbol{\theta}(t)$ для точки ПЗ. При этом на графике рисунка 2 показаны слившиеся две кривые – теоретическая и фактическая КФ. Это свидетельствует о том, МКС-управление достигает поставленной цели – приведения КФ к заданному нулевому значению, что свидетельствует о практически нулевых невязках (5).

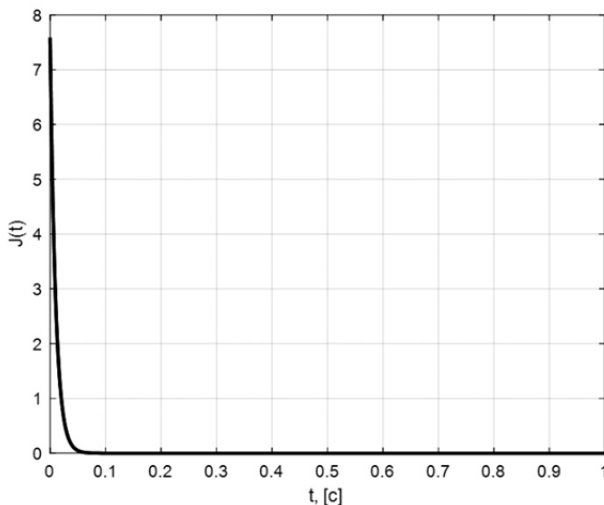


Рис. 2. Зависимость целевой функции от времени для точки ПЗ

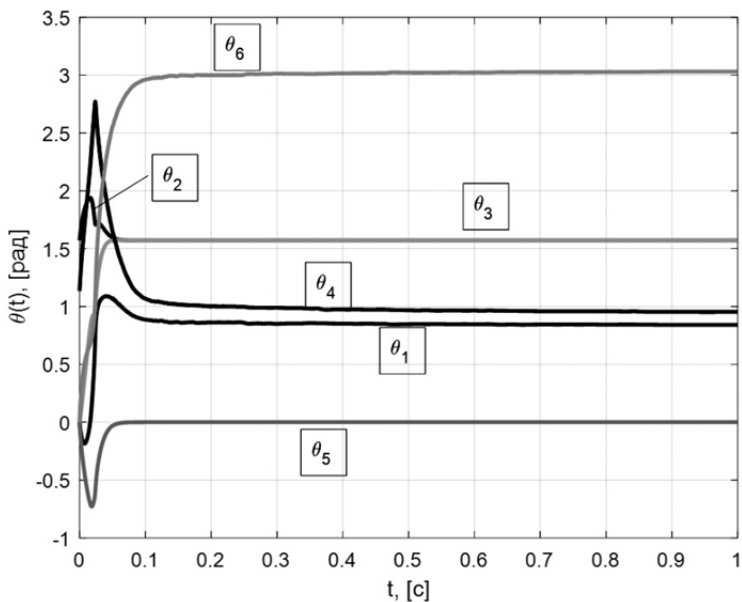


Рис. 3. Зависимости углов $\theta_i(t), i = 1, \dots, 6$ для точки ПЗ

В таблице 2 приведены конечные значения углов $\theta_i(t_f), i = 1, \dots, 6$ для точек П1 – П6 вместе с их предельными диапазонами.

Таблица 2. Предельные значения углов $\theta_i(t_f), i = 1, \dots, 6$

	θ_1 [$-90^\circ, +90^\circ$]	θ_2 [$-90^\circ, +180^\circ$]	θ_3 [$-180^\circ, +180^\circ$]	θ_4 [$-30^\circ, +165^\circ$]	θ_5 [$-90^\circ, +90^\circ$]	θ_6 [$-100^\circ, +100^\circ$]
П1	-1,2620	90,0100	90,0808	8,4626	-0,0683	170,4721
П2	8,3467	90,0122	89,9683	164,450 4	-0,0466	23,9068
П3	4,2298	90,0104	90,0206	54,5863	-0,0128	173,6506
П4	-2,4224	90,0097	90,0412	19,2668	-0,0294	135,2707
П5	8,7142	90,2769	56,8330	179,438 5	- 33,1665	9,1524
П6	-5,0186	90,0121	89,9861	155,830 5	-0,0297	19,1577

В большинстве случаев предельные значения соблюдаются или нарушаются незначительно. Иногда нарушение существенно, например по углу θ_6 . Однако, из рисунка 1а видно, что соответствующая КП для вращения схвата не имеет принципиальных ограничителей на угол поворота звена вокруг продольной оси, поэтому указанные ограничения можно увеличить без значительных конструктивных переделок.

7. Заключение. Сравнивая матрицы **P** с целевыми матрицами **T** для точек П1 – П7, видим, что погрешности достижения координат по осям x , y , z достаточно малы и не превышают 2 см. Погрешности конечной ориентации эффектора также очень малы (погрешности компонент единичных векторов ориентации не превышают 0,0008). При этом наибольшая погрешность наблюдается на максимальном «вылете» руки АМ. В большинстве же случаев ошибки положения лежат в пределах миллиметров и долей миллиметра. Здесь не учтены погрешности измерителей углов поворота и ротации звеньев, которые в данном подходе должны использоваться, поскольку управление использует обратные связи. Заметим также, что МКС не накапливает ошибок предыстории, поэтому случайные центрированные ошибки измерений будут компенсироваться.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Метод конечного состояния оказался работоспособным для решения задачи управления положением и ориентацией конечного эффектора антропоморфного манипулятора.
2. Точность достижения заданных значений пространственных координат удовлетворяет заданным требованиям – до 5см.
3. Двухэтапный способ учета динамики системы, примененный с целью упрощения расчетов МКС-управления, может применяться и в случае использования других методов аналитического синтеза нелинейных систем, например, принципа максимума.
4. Предлагаемый подход позволяет вместо относительно дорогих сервоприводов, обрабатывающих заданные значения предварительно рассчитанных углов поворота сочленений, использовать обычные приводы разного типа (в статье в качестве примера взят электропривод постоянного тока); при этом использование обратных связей от фактических значений углов позволяет легче достичь требуемой точности, чем при использовании программного управления.

Дальнейшие исследования в данном направлении в части применения метода на практике – идентификация моделей приводов путем проведения натуральных подводных экспериментов с целью опреде-

ления присоединенных моментов сопротивления и инерции. Целесообразно также развивать примененный здесь двухэтапный подход для других задач управления.

Литература

1. Unmanned Underwater Vehicles (UUV) Market worth 5.20 Billion USD by 2022 // MarketsandMarkets. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/unmanned-underwater-vehicles.asp>. (дата обращения: 20.01.2020).
2. Casalino G., Caccia M., Caiti A., Antonelli G., Indiveri G., Melchiorri C., Caselli S. MARIS: A National Project on Marine Robotics for InterventionS, in: Proc. 22nd Mediterranean Conf. on Control and Automation, MED'14, IEEE, 2014, pp. 864 - 869.
3. Lane D.M., Maurelli F., Larkworthy T., Caldwell D., Salvi J., Fox M., Kyriakopoulos K. PANDORA: Persistent Autonomy through Learning, Adaptation, Observation and Re-planning // IFACPapersOnLine. Vol. 48. Issue 2. 2015. pp. 238–243.
4. Sanz P.J., Ridao P., Oliver G., Casalino G., Petitot Y., Silvestre C., Melchiorri C., Turetta A. TRIDENT An European Project Targeted to Increase the Autonomy Levels for Underwater Intervention Missions // 2013 OCEANS - San Diego, 23-27 Sept. 2013. pp. 1 – 10.
5. Разработка и исследование робототехнического комплекса для выполнения подводно-технических работ в условиях ограниченной видимости с использованием комплексной системы 3D-зрения высокого разрешения /А.А.Кабанов, В.А. Крамарь, Е.А. Шушляпин и др. // Отчет о НИР (г/б №АААА-А18-11812259008). Севастополь, СевГУ, 2018.
6. Kabanov A.A., Balabanov A.N. The modeling of an anthropomorphic robot arm // MATEC Web of Conferences 224, Vol. 224, 2018 (Proceedings of International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018) Sevastopol, Russia, September 10-14, 2018, 6 pages.
7. FEDOR: Final Experimental Demonstration Object Research. URL: <https://dfnc.ru/kosmos/fedor-robot-poletel-v-kosmos/> (Дата обращения 24.02.2020).
8. Подводные манипуляторы. URL: http://www.oceanos.ru/s1/files/File/2017_LFL_manip.pdf (Дата обращения 15.01.2020).
9. Автономный подводный робот-краб. URL: <https://ria.ru/science/20180419/1518950715.html> (Дата обращения 04.09.2019).
10. Облегченный подводный пятистепенной электроманипулятор. URL: <http://www.tetis-pro.ru/news/803/> (Дата обращения 24.01.2020).
11. Подводный робот политехников «Одиссей». URL: https://news.tpu.ru/news/2016/11/11/26198/?title=podvodnyy_robot_politehnikov_pozvolit_o&print=1 (Дата обращения 05.09.2019).
12. Vu N.Thi-Thuy, Tran N. P., Nguyen N.H. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Based Path Planning for Excavator Arm // Hindawi Journal of Robotics, Volume 2018 |Article ID 2571243. 7 pages.
13. Han X., Yin M., Liu X., Yin G. Solution of inverse kinematics and movement trajectory simulation for 6R robot // Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition). vol. 47, no. 6, 2015, pp. 185–190.
14. She M., Tian L. A Novel Path Control Algorithm for Networked Underwater Robot // Hindawi Journal of Robotics. Volume 2018. Article ID 1520981. 7 pages.

15. Ananthanarayanan H., Ordóñez R. Real-time Inverse Kinematics of $(2n + 1)$ DOF hyper-redundant manipulator arm via a combined numerical and analytical approach // Mechanism and Machine Theory. vol. 91. 2015. pp. 209–226.
16. Legowski A. The global inverse kinematics solution in the adept six 300 manipulator with singularities robustness // Proceedings of the 20th International Conference on Control Systems and Computer Science, CSCS 2015. Romania. 2015. pp. 90–97.
17. Mahmoodabadi M. J., Ziaei A. Inverse Dynamics Based Optimal Fuzzy Controller for a Robot Manipulator via Particle Swarm Optimization // Hindawi Journal of Robotics, Volume 2019. Article ID 5052185. 10 pages.
18. Mendili M., Bouani F. Predictive control of mobile robot using kinematic and dynamic models // Journal of Control Science and Engineering. vol. 2017. Article ID 5341381, 11 pages.
19. LIN Y. Solution of Inverse Kinematics for General Robot Manipulators Based on Multiple Population Genetic Algorithm // Journal of Mechanical Engineering, vol. 53. no. 3. 2017. p. 1.
20. Momani S., Abo-Hammour Z.S., Alsmadi O.M.K. Solution of inverse kinematics problem using genetic algorithms // Applied Mathematics & Information Sciences. vol. 10. no. 1. 2016. pp. 225–233.
21. Wang H-J, Fu Y., Zhao Z-Q, Yue Y-J. An Improved Ant Colony Algorithm of Robot Path Planning for Obstacle Avoidance // Hindawi Journal of Robotics. Volume 2019. Article ID 6097591. 8 pages.
22. Kong H., Li N., Shen Y. Adaptive double chain quantum genetic algorithm for constrained optimization problems // Chinese Journal of Aeronautics. vol. 28. no. 1, 2015. pp. 214–228.
23. Lv X., Zhao M. Application of Improved BQGA in Robot Kinematics Inverse Solution // Hindawi Journal of Robotics. Volume 2019. Article ID 1659180. 7 pages.
24. Zhao M., Dai Y. Application of fuzzy ant colony algorithm to robotics arm inverse kinematics problem // ICIC Express Letters. vol. 10. no. 1. 2016. pp. 43–49.
25. Zhang Y.F., Ma Z.S. A simulated annealing neural network solution to inverse kinematics of EOD manipulator // Computer Measurement & Control. vol. 23. no. 4. 2015. pp. 1269–1272.
26. Шушляпин Е.А., Безуглая А.Е. Управление антропоморфным роботом методом конечного состояния // «Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения АППР-2019», г. Севастополь, 09–13 сентября 2019 г. Материалы IV Международной научно-технической конференции / «Автоматизация и измерения в машиноприборостроении». №3(7). 2019. С.38 – 47.
27. Denavit J., Hartenberg R.S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices // Transactions ASME Journal of Applied paMechanics. 23, 1955. pp. 215–221.
28. Шушляпин Е.А. Управление нелинейными системами на основе прогноза конечного состояния неуправляемого движения // Севастополь: СевНТУ, 2012. 282 с.
29. Алексеев В.М. Об одной оценке возмущений обыкновенных дифференциальных уравнений // Вестн. Москов. ун-та. Сер.1. Математика, механика. 1961. №2. С.28 – 36.
30. Шушляпин Е.А. и др. Нелинейные регуляторы для удержания судна на заданной траектории при «сильных» маневрах // Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 53. С. 178–200.
31. Shushlyapin E.A., Bezuglaya A.E. Analytical Synthesis of Regulators for Nonlinear Systems with a Terminal State Method on Examples of Motion Control of a Wheeled Robot and a Vessel // Hindawi Journal of Applied Mathematics, vol. 2018 Article ID 4868791, 2018, 13 pages.

Балабанов Алексей Николаевич — канд. техн. наук, доцент, кафедра информатики и управления в технических системах института информационных технологий и управления в технических системах, Севастопольский государственный университет (СевГУ). Область научных интересов: оптимизация и синтез систем автоматического управления. Число научных публикаций — 20. alexey.balabanov83@gmail.com; пр. Октябрьской революции, 25, 299057, Севастополь, Россия; р.т.: +7 (978) 012-4469.

Безуглая Анна Евгеньевна — канд. техн. наук, доцент, кафедра информационных систем института информационных технологий и управления в технических системах, Севастопольский государственный университет (СевГУ). Область научных интересов: робототехника. Число научных публикаций — 31. anna_bezuglaya@list.ru; ул. Колобова, 19, 299038, Севастополь, Россия; р.т.: +7 (978) 709-33-78.

Шушляпин Евгений Андреевич — д-р техн. наук, профессор, кафедра информатики и управления в технических системах института информационных технологий и управления в технических системах, Севастопольский государственный университет (СевГУ). Область научных интересов: управление нелинейными системами. Число научных публикаций — 141. bu6@bk.ru; ул. Молодых строителей, 16, 299006, Севастополь, Россия; р.т.: +7 (8692) 435-130.

Поддержка исследований. Данные исследования выполняются при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (соглашение № 14.578.21.0264, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57818X0264).

A. BALABANOV, A. BEZUGLAYA, E. SHUSHLYAPIN
UNDERWATER ROBOT MANIPULATOR CONTROL

Balabanov A., Bezuglaya A., Shushlyapin E. Underwater Robot Manipulator Control.

Abstract. This paper deals with the problem of bringing the end effector (grip center) of an underwater vehicle anthropomorphic manipulator to a predetermined position in a given time using the terminal state method. A dynamic model with the account of joint drives dynamics is formulated on the basis of obtained kinematic model constructed by using the Denavit-Hartenberg method (DH model). The DH model is used in a terminal nonlinear criterion that displays estimate of the proximity of the effector's orientation and position to the specified values. The dynamic model is adapted for effective application of the author's terminal state method (TSM) so that it forms a system of differential equations for the rotation angles of manipulator links around the longitudinal and transverse axes, having only desired TSM-controls in the right parts. The converted model provides simplifications of controls calculation by eliminating the numerical solution of special differential equations, that is needed in the case of using in TSM nonlinear dynamic models in general form. The found TSM-controls are further used in expressions for control actions on joints electric drives obtained on the basis of electric drives dynamic models. Unknown drives parameters as functions of links rotation angles or other unknown factors, are proposed to be determined experimentally. Such two-step procedure allowed to get drive control in the form of algebraic and transcendental expressions. Finally, by applying the developed software, simulation results of the manipulator end effector moving to the specified positions on the edge of the working area are presented. The resulting error (without accounting measurement error) does not exceed 2 centimeters at the 1.2 meters distance by arm reaching maximum of length ability. The work was performed under the Federal program of developing a robotic device for underwater research in shallow depths (up to 10 meters).

Keywords: underwater research device, anthropomorphic manipulator, nonlinear system, terminal state method, terminal control, Denavit-Hartenberg kinematic model, manipulator dynamic model.

Balabanov Alexey — Ph.D., Associate professor, Department of informatics and control in technical systems in institute of information technologies and control in technical systems, Sevastopol State University. Research interests: control systems optimization and synthesis. The number of publications — 20. alexey.balabanov83@gmail.com; 25, October Revolution Ave., 299057, Sevastopol, Russia; office phone: +7 (978) 012-4469.

Bezuglaya Anna — Ph.D., Associate professor, Department of informatics and control in technical systems in institute of information technologies and control in technical systems, Sevastopol State University. Research interests: robotics. The number of publications — 31. anna_bezuglaya@list.ru; 19, Kolobova St., 299038, Sevastopol, Russia; office phone: +7 (978) 709-33-78.

Shushlyapin Evgeny — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Department of informatics and control in technical systems in institute of information technologies and control in technical systems, Sevastopol State University. Research interests: nonlinear systems control. The number of publications — 141. 6u6@bk.ru; 16, Molodykh stroiteley St., 299006, Sevastopol, Russia; office phone: +7 (8692) 435-130.

Acknowledgements. Studies were supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement № 14.578.21.0264, project RFMEFI57818X0264).

References

1. Unmanned Underwater Vehicles (UUV) Market worth 5.20 Billion USD by 2022 // MarketsandMarkets. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/unmanned-underwater-vehicles.asp>. (Last issue: 20.04.2020).
2. Casalino G., Caccia M., Caiti A., Antonelli G., Indiveri G., Melchiorri C., Caselli S. MARIS: A National Project on Marine Robotics for InterventionS, in: Proc. 22nd Mediterranean Conf. on Control and Automation, MED'14, IEEE, 2014, pp. 864 - 869.
3. Lane D.M., Maurelli F., Larkworthy T., Caldwell D., Salvi J., Fox M., Kyriakopoulos K. PANDORA: Persistent Autonomy through Learning, Adaptation, Observation and Re-planning // IFACPapersOnLine. Volume 48. Issue 2. 2015. pp. 238–243.
4. Sanz P.J., Ridao P., Oliver G., Casalino G., Petillot Y., Silvestre C., Melchiorri C., Turetta A. TRIDENT An European Project Targeted to Increase the Autonomy Levels for Underwater Intervention Missions // 2013 OCEANS - San Diego, 23-27 Sept. 2013. pp.1 – 10.
5. [Development and research of a robotic system for performing underwater technical work in conditions of limited visibility using a high-resolution 3D-vision com-Plex system] Razrabotka i issledovanie robototekhnicheskogo kompleksa dlja vypolnenija podvodno-tehnicheskikh rabot v uslovijah ogranichennoj vidimosti s ispol'zovaniem kompleksnoj sistemy 3D-zrenija vysokogo razreshenija / A.A.Kabanov, V.A. Kramar, E.A. Shushljapin i dr. // [Research report] Otchet o NIR (№AAAA-A18-11812259008). Sevastopol', SevGU, 2018. (In Russ.).
6. Kabanov A.A., Balabanov A.N. The modeling of an anthropomorphic robot arm // MATEC Web of Conferences 224, Vol. 224, 2018 (Proceedings of International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018) Sevastopol, Russia, September 10-14, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822404024>.
7. FEDOR: Final Experimental Demonstration Object Research. URL: <https://dfnc.ru/kosmos/fedor-robot-poletel-v-kosmos/> (Date of issue 24.02.2020) (In Russ.).
8. [Underwater manipulators] Podvodnye manipulyatory URL: http://www.oceanos.ru/s1/files/File/2017_LFL_manip.pdf (Date of issue 15.01.2020) (In Russ.).
9. [Autonomous underwater robot-crab] Avtonomnyj podvodnyj robot-krab URL: <https://ria.ru/science/20180419/1518950715.html> (Date of issue 04.09.2019) (In Russ.).
10. [Lightweight underwater five-stage electric manipulator] Oblegchennyj podvodnyj pjatistepennoj jelektromanipulyator. URL: <http://www.tetis-pro.ru/news/803/> (Date of issue 24.01.2020). (In Russ.).
11. [Underwater robot of polytechnics «Odyssey»] Podvodnyj robot politehnikov «Odisej» URL: https://news.tpu.ru/news/2016/11/11/26198/?title=podvodnyy_robot_politehnikov_pozvolit_o&print=1 (Date of issue 05.09.2019) (In Russ.).
12. Vu N.Thi-Thuy, Tran N.P., Nguyen N.H. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Based Path Planning for Excavator Arm // Hindawi Journal of Robotics, Volume 2018 |Article ID 2571243. 7 pages.

13. Han X., Yin M., Liu X., Yin G. Solution of inverse kinematics and movement trajectory simulation for 6R robot // Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition). vol. 47, no. 6, 2015, pp. 185–190.
14. She M., Tian L. A Novel Path Control Algorithm for Networked Underwater Robot // Hindawi Journal of Robotics. Volume 2018. Article ID 1520981.
15. Ananthanarayanan H., Ordóñez R. Real-time Inverse Kinematics of $(2n + 1)$ DOF hyper-redundant manipulator arm via a combined numerical and analytical approach // Mechanism and Machine Theory. vol. 91. 2015. pp. 209–226.
16. Legowski A. The global inverse kinematics solution in the adept six 300 manipulator with singularities robustness // Proceedings of the 20th International Conference on Control Systems and Computer Science, CSCS 2015. Romania. 2015. pp. 90–97.
17. Mahmoodabadi M. J., Ziaei A. Inverse Dynamics Based Optimal Fuzzy Controller for a Robot Manipulator via Particle Swarm Optimization // Hindawi Journal of Robotics, Volume 2019. Article ID 5052185.
18. Mendili M., Bouani F. Predictive control of mobile robot using kinematic and dynamic models // Journal of Control Science and Engineering. vol. 2017. Article ID 5341381,
19. LIN Y. Solution of Inverse Kinematics for General Robot Manipulators Based on Multiple Population Genetic Algorithm // Journal of Mechanical Engineering, vol. 53, no. 3. 2017. p. 1.
20. Momani S., Abo-Hammour Z.S., Alsmadi O.M.K. Solution of inverse kinematics problem using genetic algorithms // Applied Mathematics & Information Sciences. vol. 10, no. 1. 2016. pp. 225–233.
21. Wang H-J, Fu Y.,Zhao Z-Q, Yue Y-J. An Improved Ant Colony Algorithm of Robot Path Planning for Obstacle Avoidance // Hindawi Journal of Robotics. Volume 2019. Article ID 6097591.
22. Kong H., Li N., Shen Y. Adaptive double chain quantum genetic algorithm for constrained optimization problems // Chinese Journal of Aeronautics. vol. 28. no. 1, 2015. pp. 214–228.
23. Lv X., Zhao M. Application of Improved BQGA in Robot Kinematics Inverse Solution // Hindawi Journal of Robotics. Volume 2019. Article ID 1659180
24. Zhao M., Dai Y. Application of fuzzy ant colony algorithm to robotics arm inverse kinematics problem // ICIC Express Letters. vol. 10. no. 1. 2016. pp. 43–49.
25. Zhang Y.F., Ma Z.S. A simulated annealing neural network solution to inverse kinematics of EOD manipulator // Computer Measurement & Control. vol. 23. no. 4. 2015. pp. 1269–1272.
26. Shushlyapin E.A., Bezuglaya A.E. [Control of anthropomorphic robot using terminal state method] Upravlenie antropomorfnyh robotom metodom konechnogo sostoyaniya // [Automation and instrumentation: problems, solutions APR-2019", Sevastopol, 09 - 13 September 2019. Materials of the IV International scientific and technical conference / "Automation and measurement in machine-instrument engineering"] "Avtomatizacija i priborostrojenije: problemy, reshenija APPR-2019". Sevastopol. 09 – 13 sentyabrya 2019 g. Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencij / "Avtomatizacija i izmerenija v mashino- priborostrojenij". №3(7). 2019. pp. 38–47. (In Russ.).
27. Denavit J., Hartenberg R.S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices // Transactions ASME Journal of Applied Mechanics. 23, 1955. pp. 215–221.
28. Shushlyapin E.A. [Control of nonlinear systems based on the forecast end-state unmanaged traffic] Upravlenie nelinejnymi sistemami na osnove prognoza konechnogo sostoyaniya neupravlyaemogo dvizheniya. Sevastopol: SevNTU, 2012. 282p. ISBN 978–617–612–048–3. (In Russ.).

29. Alekseev V.M. [On one estimate perturbations of ordinary differential equations] Ob odnoj ocenke vozmushchenij obyknovennyh differentsialnyh uravnenij. [Bulletin of the Moscow University. Ser.1 Mathematics, mechanics] Vestn. Moskov. un-ta. Ser.1. Matematika, mekhanika. 1961. №2. pp. 28–36. (In Russ.).
30. Shushlyapin E.A., Karapetian V.A., Bezuglaja A.E., Afonina A.A. [Nonlinear Regulators for Deduction of the Vessel on the Set Trajectory at "Strong" Maneuvers] Nelinejnye regulatory dlia uderzhania sudna na zadannoj traektorii pri "silnikh" manevrakh // Proceeding of SPIIRAS. 2017. St. Pb: SPIIRAS, Issue. 53. pp. 178–200. (In Russ).
31. Shushlyapin E.A., Bezuglaya A.E. Analytical Synthesis of Regulators for Nonlinear Systems with a Terminal State Method on Examples of Motion Control of a Wheeled Robot and a Vessel // Hindawi Journal of Applied Mathematics, vol. 2018 Article ID 4868791, 2018, 13 pages.