

## АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ПОЗИЦИОННОГО ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННЫМ РОБОТОМ С ЗАДАВАЕМОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА

Е. Н. РОСТОВА

*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН,  
199178, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: rostovae@mail.ru*

Рассмотрены задачи полуавтоматического управления манипуляционными роботами с задаваемыми человеком-оператором положением и ориентацией рабочего инструмента. Проанализированы теоретические методы задания ориентации. Приведены обратные задачи кинематики, решаемые в позиционных системах управления шестизвенным роботом. Рассмотрены способы решения таких задач при помощи итерационных методов с вычислением матрицы Якоби исполнительного механизма робота и без вычисления. Приведены примеры расчета траекторий звеньев шестизвенного робота на заданной спиралевидной траектории движения рабочего инструмента с использованием разных способов задания его ориентации. Исследована сходимость итерационных алгоритмов решения обратных задач кинематики.

**Ключевые слова:** *манипуляционные роботы, системы полуавтоматического управления роботами, позиционное управление, человек-оператор, положение и ориентация рабочего инструмента, обратная задача кинематики, итерационные численные методы, сходимость алгоритмов*

**Введение.** Во многих областях деятельности широкое применение находят биотехнические системы управления манипуляционными роботами [1—9], в которых человек-оператор управляет движением схвата или другого рабочего инструмента с помощью задающего манипулятора или многостепенных задающих рукояток типа джойстиков. Человек является неотъемлемой частью таких систем и представляет собой динамическое звено в общем контуре визуального управления роботом.

В копирующих системах управления оператор непосредственно задает программные положения звеньев робота с помощью датчиков положений звеньев манипулятора. Движения могут быть воспроизведены либо следящими приводами робота, либо посредством двумерных обратимых следящих систем соответствующих пар звеньев задающего манипулятора и робота. В полуавтоматических системах, в отличие от копирующих, для управления положением и ориентацией рабочего инструмента шестизвенного робота необходимы две задающие рукоятки, кинематические схемы и габариты которых существенно отличаются от геометрических параметров исполнительного механизма робота.

Предметом рассмотрения в статье являются алгоритмы полуавтоматического позиционного управления шестизвенным манипуляционным роботом с задаваемыми человеком-оператором положением и ориентацией его рабочего инструмента. Основными задачами работы являются:

- рассмотрение задач позиционного полуавтоматического управления роботом с задаваемой ориентацией рабочего инструмента,
- обсуждение теоретических методов задания ориентации,
- формулировка обратных задач кинематики в соответствии с разными вариантами задания ориентации;

— анализ алгоритмов итерационных численных методов, необходимых для решения обратных задач кинематики в разных постановках;

— тестирование и исследование сходимости итерационных алгоритмов на конкретных практических примерах позиционного управления шестизвенным роботом.

**Задачи позиционного полуавтоматического управления.** При позиционном управлении роботом его вектором состояния является  $(6 \times 1)$ -вектор

$$S = \begin{pmatrix} P \\ O \end{pmatrix},$$

где  $P = (X, Y, Z)^T$  — вектор координат положения инструмента,  $O = (\varphi, \theta, \psi)^T$  — вектор углов ориентации инструмента.

В полуавтоматических системах управления сигналы от рукоятки преобразуются посредством специализированного вычислительного устройства (СВУ) в  $(6 \times 1)$ -вектор программных положений звеньев робота. При этом в СВУ в реальном времени выполняются [10—12]:

1) прямые задачи кинематики о положениях задающих рукояток

$$P_{h1} = (X_{h1}, Y_{h1}, Z_{h1})^T = F_{h1}(q_{h1}), \quad (1)$$

$$P_{h2} = (X_{h2}, Y_{h2}, Z_{h2})^T = F_{h2}(q_{h2}), \quad (2)$$

где  $q_{h1}$  и  $q_{h2}$  —  $(3 \times 1)$ -векторы положений звеньев рукоятки, измеряемых их датчиками,  $F_{h1}(q_{h1})$  и  $F_{h2}(q_{h2})$  —  $(3 \times 1)$ -вектор-функции, соответствующие кинематическим схемам рукояток;

2) масштабирование векторов  $P_{h1}$  и  $P_{h2}$  с заданными масштабными коэффициентами

$$P_p = (X_p, Y_p, Z_p)^T = (M_x X_{h1}, M_y Y_{h1}, M_z Z_{h1})^T, \quad (3)$$

$$O_p = (\varphi_p, \theta_p, \psi_p)^T = (M_\varphi X_{h2}, M_\theta Y_{h2}, M_\psi Z_{h2})^T, \quad (4)$$

где вычисленные векторы  $P_p$  и  $O_p$  интерпретируются как программные векторы положения и углов ориентации рабочего органа робота, задаваемые человеком-оператором;

3) обратная задача кинематики о программных положениях звеньев робота

$$q_p = (q_{p1}, q_{p2}, \dots, q_{p6})^T = F_M^{-1}(S_p), \quad (5)$$

где  $S_p = \begin{pmatrix} P_p \\ O_p \end{pmatrix}$  — программный  $(6 \times 1)$ -вектор состояния робота,  $F_M^{-1}(S_p)$  — нелинейная  $(6 \times 1)$ -вектор-функция, обратная вектор-функции  $F_M(q)$ , соответствующей кинематической схеме исполнительного механизма робота;

4) тестирование программных положений звеньев робота, в том числе с использованием 3D-анимации программного движения робота с закрепленным на его руке инструментом;

5) прямая задача кинематики о реальном векторе состояния робота

$$S_r = \begin{pmatrix} P_r \\ O_r \end{pmatrix} = F_M(q_r), \quad (6)$$

где  $P_r = (X_r, Y_r, Z_r)^T$  — вектор координат положения инструмента,  $O_r = (\varphi_r, \theta_r, \psi_r)^T$  — вектор углов ориентации инструмента,  $q_r = (q_{r1}, q_{r2}, \dots, q_{r6})^T$  — вектор положений звеньев

робота, измеряемых их датчиками,  $F_M(q)$  — нелинейная  $(6 \times 1)$ -вектор-функция, соответствующая кинематической схеме исполнительного механизма робот;

б) оценивание ошибок по координатам положения и ориентации инструмента, в том числе с использованием 3D-анимации реального движения робота.

**Теоретические методы задания ориентации инструмента.** В общем случае, при использовании кинематической модели  $N$ -звенного робота в однородных координатах [13—15], положение и ориентацию инструмента в базовой (нулевой) системе координат определяет  $(4 \times 4)$ -матрица следующего вида:

$$T_N(q) = A_1(q_1)A_2(q_2)\dots A_N(q_N) = \begin{pmatrix} R & P \\ 000 & 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где  $A_i(q_i)$  —  $(4 \times 4)$ -матрицы преобразования однородных координат звеньев робота,  $P = (X, Y, Z)^T$  —  $(3 \times 1)$ -вектор координат положения центра и  $R = (n \ o \ a)$  —  $(3 \times 3)$ -матрица поворота (rotation matrix) системы координат инструмента, элементами столбцов которой являются координаты  $(3 \times 1)$ -векторов нормали, ориентации и подхода соответственно:

$$n = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix}, \quad o = \begin{pmatrix} o_x \\ o_y \\ o_z \end{pmatrix}, \quad a = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}.$$

Первым, наиболее общим, методом задания ориентации является задание матрицы поворота  $R$  векторами ориентации и подхода (шесть параметров) и последующее вычисление координат вектора нормали с использованием операции векторного произведения

$$(o \ a) \rightarrow n = o \times a. \quad (8)$$

Вторым методом является задание ориентации четырьмя параметрами

$$(\vartheta \ V_c) = (\vartheta \ c_x \ c_y \ c_z), \quad (9)$$

где  $\vartheta$  — угол поворота (rotation angle) вокруг некоторой оси, ориентированной вектором направляющих косинусов  $V_c$  (vector of orientation cosines indicating the rotation axis).

Третьим методом является задание ориентации тремя параметрами — одним из шести возможных вариантов углов Эйлера

$$EUL = (\varphi \ \vartheta \ \psi)^T. \quad (10)$$

Четвертым методом является задание ориентации тремя параметрами — наиболее часто используемыми в системах управления роботами углами крена, тангажа и рысканья

$$RPY = (\theta_{roll} \ \theta_{pitch} \ \theta_{yaw})^T \quad (11)$$

или другими углами Кардано из шести возможных вариантов.

**Итерационные методы решения обратных задач кинематики.** С вычислительной точки зрения задача (5) требует решения системы нелинейных алгебраических уравнений следующего вида:

$$F(q) = F_M(q) - S_p = 0, \quad (12)$$

где  $S_p$  — заданный программный  $(6 \times 1)$ -вектор положения и ориентации,  $0$  — нулевой  $(6 \times 1)$ -вектор,  $F(q)$  — вектор невязки,  $q$  — искомый вектор программных положений звеньев робота.

В зависимости от выбранного способа задания ориентации инструмента система алгебраических уравнений (12) может решаться различными численными методами [16, 17].

**Методы с непосредственным вычислением матрицы Якоби.** В случае шестизвенного робота для решения системы уравнений (12) можно воспользоваться алгоритмом метода Ньютона

$$q^{k+1} = q^k - \alpha_k J^{-1}(q^k) F(q^k), \quad (13)$$

где величина постоянного или переменного шага итерационного процесса  $\alpha_k \leq 1$ . При этом на каждом шаге требуется вычислять вектор невязки  $F(q^k)$  и матрицу  $J^{-1}(q^k)$ , обратную квадратной матрице Якоби исполнительного механизма робота. Но в случаях плохой обусловленности или понижения ранга матрицы Якоби из-за ее вырождаемости на заданной траектории работоспособность алгоритма (13) теряется.

Приближенные решения обратной задачи кинематики (ОЗК) на практике могут быть получены при замене обратной матрицы в алгоритме (13) на транспонированную матрицу Якоби, но в особых конфигурациях робота сходимость такого упрощенного алгоритма также не гарантируется. Поэтому в алгоритме (13) вместо обратной матрицы обычно используют левую псевдообратную матрицу

$$\begin{aligned} J^+(q^k) &= \left( J^T(q^k) J(q^k) \right)^{-1} J^T(q^k), \\ q^{k+1} &= q^k - \alpha_k J^+(q^k) F(q^k). \end{aligned} \quad (14)$$

Однако при вычислениях в алгоритме (14) матрица  $J^T(q^k) J(q^k)$  также может оказываться плохо обусловленной или вырожденной, и поэтому для его сходимости целесообразно использовать псевдообратную матрицу с регуляризацией, применяя следующий алгоритм:

$$q^{k+1} = q^k - \alpha_k \left[ \left( J^T(q^k) J(q^k) + \lambda_k E \right)^{-1} J^T(q^k) \right] F(q^k), \quad (15)$$

где  $E$  — единичная матрица;  $\lambda_k$  — скалярный регуляризирующий параметр.

Матрица Якоби механизма робота в алгоритмах (13)—(15) может вычисляться либо по достаточно сложным аналитическим выражениям, либо по рекурсивному алгоритму [16, 18], использующему матрицы преобразования однородных координат  $A_i(q_i)$  и операции векторных произведений векторов нормали, ориентации и подхода — столбцов  $(3 \times 3)$ -матрицы поворота системы координат рабочего инструмента робота.

**Методы без непосредственного вычисления матрицы Якоби.** В более общей постановке ОЗК можно решать как задачу минимизации квадрата нормы вектора невязки

$$\|F(q)\|^2 \rightarrow \min_{q \in D^N}, \quad (16)$$

где состав элементов вектора невязки  $F(q)$  и его размерность будут зависеть от выбранного способа задания ориентации инструмента. При этом, если на положения звеньев робота не будут накладываться ограничения  $q \in R^N$ , то задача (16) может решаться итерационными методами безусловной минимизации. Если положения звеньев ограничены областью допустимых значений  $q \in D^N$ , то задача (16) должна решаться методами условной минимизации. Но в этом случае точные решения ОЗК могут в принципе отсутствовать.

ОЗК в постановке (16) может решаться обычными квазиньютоновскими методами [17], минимизирующими сумму квадратов вектора невязки. В их алгоритмах осуществляется рекурсивная численная аппроксимация матрицы Гессе без непосредственного вычисления матрицы Якоби исполнительного механизма робота.

Для решения (16) именно как нелинейной задачи наименьших квадратов следует применять методы Гаусса—Ньютона или Левенберга—Марквардта, в алгоритмах которых для вычисления градиента и матрицы Гессе используется матрица Якоби вектора невязки  $F(q)$  — матрица его первых частных производных, которая может быть прямоугольной, если размерность вектора невязки больше шести.

**Примеры задания ориентации инструмента и решения ОЗК.** Рассмотрим примеры задания ориентации и итерационного решения ОЗК в постановке (16) на спиралевидной траектории рабочего инструмента шестизвенного робота с вращательными звеньями. Решать ОЗК в точках траектории будем, используя метод Левенберга—Марквардта. При компьютерных расчетах будем использовать пакет MATLAB и библиотеку Robotics Toolbox 10.3.1 [18, 19].

*Задание векторами ориентации и подхода [o a].* Вектор невязки в данном случае имеет размерность (9×1) и включает в себя три ошибки по координатам положения и шесть — по координатам векторов ориентации и подхода инструмента:

$$\begin{pmatrix} \|P_p - P(q)\|^2 \\ \|o_p - o(q)\|^2 \\ \|a_p - a(q)\|^2 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Зададим такие значения программных векторов  $[o_p \ a_p]$ , которым будут соответствовать значения RPY-углов  $[-45, 15, -15]^\circ$ . Используя операцию векторного произведения, вычислим программный вектор нормали  $n_p = (o_p \times a_p)$ . Заданная таким образом программная матрица поворота имеет следующие столбцы:

$$R = \begin{pmatrix} 0,9330 & 0,0062 & 0,3598 \\ -0,2500 & 0,7304 & 0,6356 \\ -0,2588 & -0,6830 & 0,6830 \end{pmatrix},$$

которым соответствуют значения угла поворота  $\vartheta = 0,8323$  рад и векторы направляющих косинусов  $V_c = [-0,8916 \ 0,4183 \ -0,1733]$ . Текущие значения векторов  $[o \ a]$  матрицы  $R$  будем вычислять, используя (4×4)-матрицы преобразования однородных координат (7).

Результаты решения ОЗК представлены на рис. 1. Тестирование показывает, что траектория инструмента (сплошная кривая на рис. 2) совпадает с программной (пунктир на рис. 2). Из рис. 2 видно, что во всех точках программной траектории инструмент имеет заданную, в данном случае верхнюю, ориентацию.

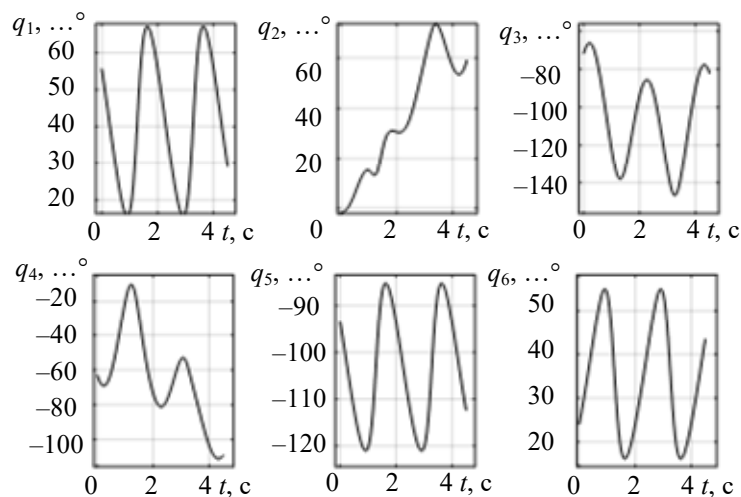


Рис. 1

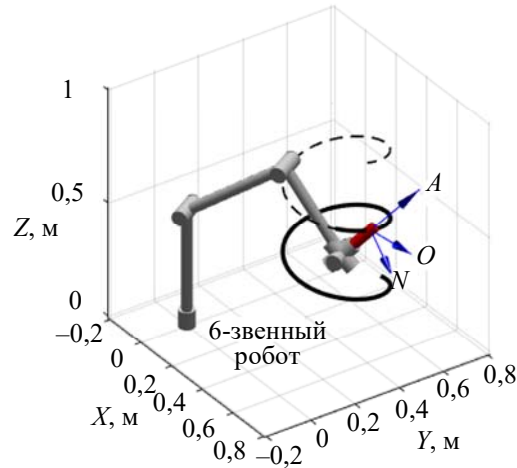


Рис. 2

Задание ориентации углом  $\vartheta$  и вектором косинусов  $V_c$ . В этом случае вектор невязки имеет размерность  $(7 \times 1)$  и включает в себя три ошибки по координатам положения инструмента, ошибку по углу  $\vartheta$  и три — по направляющим косинусам:

$$\begin{pmatrix} \|P_p - P(q)\|^2 \\ \vartheta_p - \vartheta(q) \\ \|V_p - V_c(q)\| \end{pmatrix}. \tag{18}$$

Зададим такие программные значения  $[\vartheta_p \ V_p]$ , которым будут соответствовать значения RPY-углов  $[170, -10, 10]^\circ$ , а именно  $\vartheta_p = 3,1264$  рад и  $V_p = [-0,9924 \ -0,0868 \ -0,0868]$ .

Текущие значения угла  $\vartheta(q)$  будем вычислять по следу матрицы поворота

$$\vartheta(q) = \arccos\left(\frac{1}{2}(\text{tr}(R) - 1)\right) = \arccos\left(\frac{1}{2}(n_x + o_y + a_z - 1)\right), \tag{19}$$

а значения направляющих косинусов — по следующим формулам [13]:

$$c_x = \frac{o_z - a_y}{2\sin\vartheta}; \quad c_y = \frac{a_x - n_z}{2\sin\vartheta}; \quad c_z = \frac{n_y - o_x}{2\sin\vartheta}. \tag{20}$$

Тестирование решений ОЗК и представленные на рис. 3 результаты моделирования показывают, что вычисленная траектория инструмента (сплошная кривая) совпадает с программной (пунктир), и во всех точках траектории инструмент имеет заданную, в данном случае нижнюю, ориентацию.

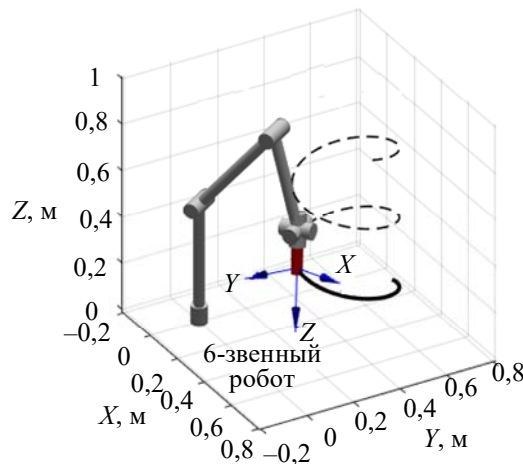


Рис. 3

Зададим другие программные значения  $\vartheta_p = 1,3992$  рад и  $V_p = [0,9816 \quad 0,1900 \quad 0,0166]$ , которым соответствуют  $RPY$ -углы  $[80, 10, 10]^\circ$ .

Тестирование решений ОЗК и представленные на рис. 4 результаты моделирования показывают, что вычисленная траектория инструмента (сплошная кривая) совпадает с программной (пунктир), и во всех точках траектории инструмент имеет заданную, в данном случае левую, ориентацию.

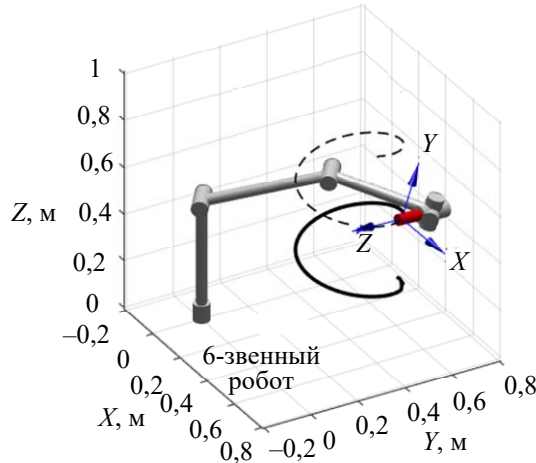


Рис. 4

Задание ориентации вектором углов  $RPY$ . Вектор невязки имеет размерность  $(6 \times 1)$  и включает в себя три ошибки по координатам положения инструмента и три — по углам  $RPY$ :

$$\left\| \begin{matrix} P_p - P(q) \\ RPY_p - RPY(q) \end{matrix} \right\|^2. \quad (21)$$

Зададим программные значения углов  $RPY_p = [-10, 80, -10]^\circ$ . Им соответствуют угол поворота  $\vartheta = 80,1668^\circ$  и вектор косинусов  $V_c = [-0,0166 \quad 0,9997 \quad -0,0166]$ . Текущие значения  $RPY$ -углов будем вычислять по матрице поворота  $R = R_z \cdot R_y \cdot R_x$ , определяемой матрицами поворотов вокруг соответствующих осей.

Тестирование решений ОЗК и представленные на рис. 5 результаты моделирования показывают, что вычисленная траектория инструмента (сплошная кривая) совпадает с программной (пунктир), и во всех точках траектории инструмент имеет заданную, в данном случае правую, ориентацию.

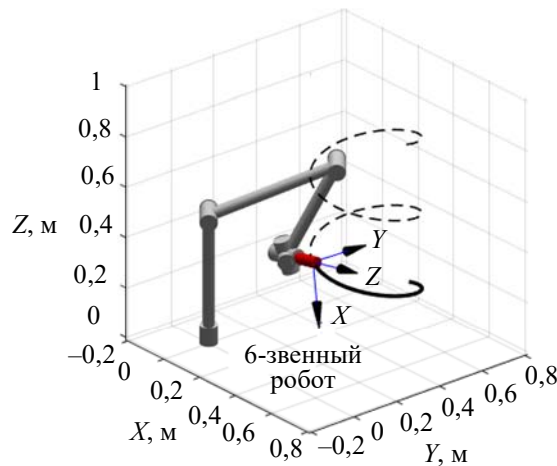


Рис. 5

Однако тестирование на других программных траекториях инструмента с другими параметрами его ориентации показывает, что итерационные решения ОЗК могут быть неточными или не сходящимися из-за кинематических ограничений, зависящих от конструктивных параметров звеньев робота и инструмента.

**Заключение.** По результатам проведенного анализа алгоритмов позиционного полуавтоматического управления можно сформулировать следующие выводы и практические рекомендации.

Наиболее сложной с вычислительной точки зрения задачей, решаемой в алгоритмах управления с заданной ориентацией инструмента, является обратная задача кинематики. При этом ее постановки и методы решения существенно зависят от выбранного способа задания ориентации инструмента робота. Решения ОЗК по сложным аналитическим выражениям, содержащим обратные тригонометрические функции, в особых (вырожденных) конфигурациях робота могут оказаться некорректными. Поэтому для решения ОЗК целесообразно применять итерационные численные методы.

При задании ориентации матрицей поворота, когда непосредственно вычисляется матрица Якоби исполнительного механизма робота, целесообразно применять итерационные алгоритмы с регуляризацией. Матрицу Якоби при этом рекомендуется вычислять по рекурсивному алгоритму, использующему кинематические модели робота в однородных координатах. Однако в особых конфигурациях робота сходимость таких алгоритмов не гарантируется.

Более универсальны алгоритмы на основе минимизации вектора невязки, в которых вместо матрицы Якоби исполнительного механизма робота используются численные аппроксимации матрицы первых частных производных вектора невязки, которая может быть не только квадратной, но и прямоугольной. При этом решения ОЗК в постановке (16) могут осуществляться либо квазиньютоновскими методами, минимизирующими сумму квадратов вектора невязки, либо методами решения нелинейной задачи наименьших квадратов.

Расчеты программных траекторий звеньев шестизвенного робота при движении инструмента по спиралевидной траектории с ориентацией, задаваемой разными способами, показывают, что наиболее надежны алгоритмы решения ОЗК как нелинейной задачи наименьших квадратов.

При планировании траекторий с ориентацией инструмента оператор должен избегать задания особых (вырожденных) конфигураций робота. Базовые точки траекторий должны задаваться в рабочей области, ограниченной не только габаритными размерами и положениями звеньев робота, но и допустимыми значениями параметров ориентации инструмента. При этом анимационное моделирование позволяет проводить визуальный контроль планируемых траекторий.

Результаты анализа, изложенные в статье, и практические рекомендации по их применению могут быть учтены при создании компьютерных тренажеров и в разработках реальных систем полуавтоматического управления манипуляционными роботами.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке исследований, проводимых в рамках государственного задания № 0073-2019-0004.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин В. Ф., Архипов М. В., Журавлев В. В. Эргатические и биотехнические системы управления в медицинской робототехнике // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 5. С. 54—56.
2. Кулаков Ф. М. Телеуправление космическими роботами // Изв. РАН “Теория и системы управления”. 2016. № 4. С. 141—192.
3. Юревич Е. И. Основы робототехники. СПб: БХВ-Петербург, 2010.



4. *Cepolina F. and Michellini R. C.* Review of robotic fixtures for minimally invasive surgery // Intern. J. Med. Robot. 2004. Vol. 1, N 1. P. 43—63.
5. *Filaretov V. F., Katsurin A. A.* Method of Semiautomatic Combined Control by Manipulator Using Mobile Telecamera // Proc. on 11th Intern. Conf. on Control, Automation and Systems, KINTEX. Gyeonggi-do, Korea, 2011. P. 649—654.
6. *Filaretov V. F., Katsurin A. A.* Method of Semiautomatic Position Control by Manipulator Using Telecamera Which Changes Its Orientation // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 717. P. 573—578.
7. *Soares B. F.* Master-Slave Servo-Bilateral Control of Direct Drive Electrical Manipulators // ABCM Symposium Series in Mechatronics of the 21th Intern. Congr. of Mechanical Engineering. Natal, RN, Brazil. 2008. Vol. 3. P. 246—255.
8. Schilling Robotics/Technologies [Электронный ресурс]: <www.fmctechnologies.com>.
9. *Wall J., Chandra V., Krummel T.* Robotics in General Surgery // Medical Robotics / Ed. by *V. Bozovic*. I-Tech Education and Publishing, Vienna, Austria, 2008. P. 491—506.
10. *Rostova E., Rostov N., Sokolov B.* Structural Analysis and Animated Simulation of Biotechnical Position-Velocity Control System of a Robot Manipulator // Proc. of Interactive Collaborative Robotics. 3rd Intern. Conf. ICR 2018. Leipzig, Germany, 2018. P. 222—232. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99582-3\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99582-3_23).
11. *Rostova E., Rostov N., Sobolevsky V., Zakharov V.* Design and Simulation of Biotechnical Multidimensional Motion Control Systems of a Robot Manipulator // Proc. of Interactive Collaborative Robotics. 3rd Intern. Conf. ECMS 2019. Caserta, Italy, 2019. P. 222—232. DOI: 10.7148/2019-0145.
12. *Ростова Е. Н.* Комплекс компьютерных моделей для исследования полуавтоматических систем управления манипуляционными роботами // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 11. С. 989—996. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2019-62-11-989-996>.
13. *Зенкевич С. Л., Ющенко А. С.* Основы управления манипуляционными роботами: учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
14. *Игнатова Е. И., Лопота А. В., Ростов Н. В.* Системы управления движением роботов. Компьютерное проектирование. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. 302 с.
15. *Park F., Lynch K.* Modern Robotics: Mechanics, Planning and Control. Cambridge University Press, 2016. 544 p.
16. *Ростов Н. В.* Анализ алгоритмов решения обратных задач кинематики в системах управления движением роботов // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2014. № 5(205). С. 93—99.
17. *Dennis J. E., Schnabel R. B.* Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations. Society for Industrial and Applied Mathematics. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hal, 1996.
18. *Corke P. I.* Robotics Toolbox 10.3.1 for MATLAB. Release 10. 2018.
19. *Corke P. I.* Robotics, Vision and Control. Fundamental Algorithms in MATLAB. Second edition. Springer International Publishing AG, 2017. ISBN 978-3-319-54413-7.

**Сведения об авторе**

**Екатерина Николаевна Ростова**

— аспирант; СПб ФИЦ РАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: [rostovae@mail.ru](mailto:rostovae@mail.ru)

Поступила в редакцию  
02.10.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** *Ростова Е. Н.* Анализ алгоритмов позиционного полуавтоматического управления манипуляционным роботом с задаваемой ориентацией рабочего инструмента // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 2. С. 109—118.

## ANALYSIS OF ALGORITHMS FOR POSITIONAL SEMI-AUTOMATIC CONTROL OF A ROBOT MANIPULATOR WITH A GIVEN ORIENTATION OF THE WORKING TOOL

E. N. Rostova

*St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,  
199178, St. Petersburg, Russia  
E-mail: rostovae@mail.ru*

The problems of semi-automatic control of a robot manipulator with position and orientation of the working tool set by a human operator are considered. Theoretical methods of setting robot tool orientation are discussed. Inverse kinematic problems solved in position control systems for a 6-link robot are formulated. Ways of solving such problems using iterative numerical methods with and without calculating the Jacobi matrix corresponding to the robot's mechanism are studied. Examples of joint trajectories calculation for a 6-link robot moving the tool along a helical trajectory using different techniques of setting the tool orientation are presented. Convergence of iterative algorithms for solving inverse kinematic problems are analyzed.

**Keywords:** robot manipulator, semi-automatic robot control system, positional control, human operator, tool position and orientation, inverse kinematic problem, iterative numerical methods, algorithm testing, algorithm convergence

### REFERENCES

1. Golovin V.F., Arkhipov M.V., Zhuravlev V.V. *Mehatronika, Avtomatizacia, Upravlenie* (Mechatronics, Automation, Control), 2011, no. 5, pp. 54–56. (in Russ.)
2. Kulakov F.M. *Journal of Computer and Systems Sciences Intern.*, 2016, no. 4(55), pp. 635–682. (in Russ.)
3. Yurevich E.I. *Osnovy robototekhniki* (Fundamentals of Robotics), St. Petersburg, 2010. (in Russ.)
4. Cepolina F. and Michelini R.C. *Intern. J. Med. Robot.*, 2004, no. 1(1), pp. 43–63.
5. Filaretov V.F., Katsurin A.A. *Proc. on 11th Intern. Conf. on Control, Automation and Systems, KIN-TEX*, Gyeonggi-do, Korea, 2011, pp. 649–654.
6. Filaretov V.F., Katsurin A.A. *Advanced Materials Research*, 2013, no. 717, pp. 573–578.
7. Soares B.F. *ABCm Symposium Series in Mechatronics of the 21th International Congress of Mechanical Engineering*, Natal, RN, Brazil, 2008, vol. 3, pp. 246–255.
8. *Schilling Robotics/Technologies*, www.fmctechnologies.com.
9. Wall J., Chandra V., Krummel T. *Medical Robotics*, I-Tech Education and Publishing, Vienna, Austria, 2008, pp. 491–506.
10. Rostova E., Rostov N., Sokolov B. *Proc. of Interactive Collaborative Robotics*, 3rd Intern. Conf., ICR 2018, Leipzig, Germany, 2018, pp. 222–232. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99582-3\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99582-3_23).
11. Rostova E., Rostov N., Sobolevsky V., Zakharov V. *Proc. of Interactive Collaborative Robotics, Third International Conference, ECMS 2019, Caserta, Italy, 2019*, pp. 222–232. DOI: 10.7148/2019-0145.
12. Rostova E.N. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 11(62), pp. 989–996. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2019-62-11-989-996>. (in Russ.)
13. Zenkevich S.L., Yushchenko A.S. *Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami* (Fundamentals of Manipulation Robot Control), Moscow, 2004. (in Russ.)
14. Ignatova E.I., Lopota A.V., Rostov N.V. *Sistemy upravleniya dvizheniyem robotov. Komp'yuternoye proyektirovaniye* (Robot Motion Control Systems. Computer Design), St. Petersburg, 2014, 302 p. (in Russ.)
15. Park F., Lynch K. *Modern Robotics: Mechanics, Planning and Control*, Cambridge University Press, 2016, 544 p.
16. Rostov N.V. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems*, 2014, no. 5(205), pp. 93–99. (in Russ.)
17. Dennis J.E., Schnabel R.B. *Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1996.
18. Corke P.I. *Robotics Toolbox 10.3.1 for MATLAB*. Release 10. 2018.
19. Corke P.I. *Robotics, Vision and Control. Fundamental Algorithms in MATLAB*, Second edition, Springer International Publishing AG, 2017. ISBN 978-3-319-54413-7.

### Data on author

**Ekaterina N. Rostova**

— Post-Graduate Student; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; E-mail: rostovae@mail.ru

**For citation:** Rostova E. N. Analysis of algorithms for positional semi-automatic control of a robot manipulator with a given orientation of the working tool. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 2. P. 109–118 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-2-109-118