

УДК 004.94:621.865.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННЫМИ РОБОТАМИ В СИСТЕМАХ ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ

Е. В. Страшнов, М. В. Михайлюк

Федеральный научный центр

*Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук
strashnov_evg@mail.ru, mix@niisi.ras.ru*

В работе рассматривается задача полуавтоматического управления манипуляторами виртуальных роботов в имитационно-тренажерных комплексах. Для решения данной задачи задействована разработанная технология виртуальных пультов управления. С помощью виртуального пульта в полуавтоматическом режиме осуществляется управление положением рабочего органа робота. Задаваемое с помощью пульта смещение рабочего органа передается функциональной схеме, в которой выполняется расчет углов поворотов в шарнирах робота. Для этого применяется метод покоординатного спуска, предназначенный для решения задачи инверсной кинематики, и ПД-регулятор для обеспечения требуемых углов поворота. Предложенные методы полуавтоматического управления роботами были реализованы в имитационно-тренажерном комплексе, предназначенном для моделирования виртуальных роботов. В данном программном комплексе на примере виртуального антропоморфного робота проведена апробация этих методов, которая показала их применимость для выполнения роботом основных технологических задач.

Ключевые слова: виртуальный робот, полуавтоматическое управление, метод покоординатного спуска, ПД-регулятор.

SIMULATION OF SEMI-AUTOMATIC CONTROL OF MANIPULATOR ROBOTS IN VIRTUAL ENVIRONMENT SYSTEMS

E. V. Strashnov, M. V. Mikhailyuk

*System Research Institute, Russian Academy of Sciences,
strashnov_evg@mail.ru, mix@niisi.ras.ru*

The paper considers the problem of semi-automatic control of virtual robots manipulators in simulator complexes. To solve this problem, the developed technology of virtual control panels is involved. The position of a robot effector is controlled in a semi-automatic mode with the use of the virtual control panel. Caused by the control panel, the change of the end effector position is transmitted to the functional scheme which calculates rotation angles in robot joints. The coordinate descent method intended for solving the inverse kinematics problem, as well as a PD controller providing the required rotation of angles are used for the purpose. The proposed methods of semi-automatic robots control were implemented in the simulator complex designed for virtual robots simulation. An approbation of these methods was carried out using the virtual model of anthropomorphic robot. The approbation showed these methods to be applicable for performing basic technological tasks by a robot.

Keywords: virtual robot, semi-automatic control, coordinate descent method, PD controller.

Введение. Одним из актуальных направлений робототехники является применение роботов для выполнения технологических операций в экстремальных условиях, опасных или

вредных для деятельности человека, например, космическая робототехника [1], в рамках которой создаются манипуляционные роботы, способные совершать работы в открытом космосе, на поверхности другой планеты или спутника, а также внутри космического аппарата. Особый интерес в данной области исследований представляет использование антропоморфных роботов, т. е. роботов, по своему строению подобных человеку [2]. Эти роботы должны помочь человеку или даже заменить его при выполнении различных работ на космических станциях, поверхностях планет и т. д. Для управления такими роботами оператор должен пройти обучение на тренажерах. Использование реальных роботов (особенно на начальном этапе обучения) может оказаться проблематичным по причине их высокой стоимости и возможности поломки в процессе тренировок. Альтернативой является обучение операторов в системах виртуального окружения, включающих виртуальные модели роботов в виртуальной среде.

Системы управления различаются по степени участия человека в процессе управления. В данной работе рассматриваются биотехнические системы управления, в которых человек-оператор непосредственно участвует в управлении манипуляционным роботом. Эти системы позволяют реализовать копирующий, командный и полуавтоматический режимы управления. Управление манипуляционным роботом в копирующем режиме осуществляется оператором с помощью задающего устройства, кинематически подобного исполнительному механизму манипулятора. В работе [3] был реализован копирующий режим управления виртуальным антропоморфным роботом при использовании экзоскелета, надеваемого на тело человека. Экзоскелеты снимают показатели углов в суставах оператора и передают их в систему управления, которая поворачивает шарниры робота на эти углы. Альтернативной реализацией копирующего режима управления роботом является использование системы Kinect [4], отслеживающей опорные точки рук. По координатам этих опорных точек нетрудно вычислить углы в суставах и таким образом реализовать копирующий режим управления антропоморфным роботом. Недостатком данного подхода является невысокая точность определения опорных точек. При командном режиме [5] управление осуществляется с помощью простейших устройств управления (кнопок, тумблеров и т. п.) последовательно каждым двигателем в отдельности. В полуавтоматическом режиме управления человек-оператор с помощью джойстика, управляющего несколькими степенями подвижности, задает лишь движение рабочего органа, а формирование согласованных движений в приводах робота осуществляется автоматически системой управления. Данный способ управления предпочтительнее командного, так как требует меньше усилий от оператора для выставления рабочего органа в нужное положение.

В конструкциях систем с полуавтоматическим управлением предусмотрены три варианта воздействия на рабочий орган манипулятора. Первый вариант состоит в том, что оператор, воздействуя на рукоятку (джойстик), изменяет направление и скорость рабочего органа. В этом случае рабочий орган перемещается в пространстве со скоростью, пропорциональной смещению рукоятки, а направление задается ее направлением смещения. Во втором случае оператор с помощью рукоятки задает рабочему органу направление и значение развиваемой им силы. Это необходимо, например, когда схват робота-манипулятора взаимодействует с объектами окружения. Последний вариант состоит в том, что оператор, воздействуя на рукоятку, задает направление и величину перемещения рабочего органа.

В данной работе рассматриваются виртуальные манипуляционные роботы, содержащие вращательные шарниры с одной степенью свободы, оснащенные электроприводами. Для реализации полуавтоматического режима предлагается управление с помощью виртуального пульта, включающего джойстик. Мы рассматриваем вариант управления, для которого отклонение джойстика задает величину и направление смещения рабочего органа манипулятора. Это приводит к необходимости решать задачу пересчета заданного оператором перемещения рабочего органа в величины напряжений, подаваемых на электроприводы робота.

Расчет углов поворота в сочленениях робота осуществляется методом покоординатного спуска, предназначенного для решения задачи инверсной кинематики, а для вычисления напряжений в функциональной схеме [6] реализован специальный ПД-регулятор. Рассмотрим эти задачи более подробно.

Метод покоординатного спуска в задаче инверсной кинематики. Пусть задана кинематическая цепь (манипулятор робота), состоящая из N звеньев, соединенных осевыми шарнирами, и одного рабочего органа на концевом звене (на рис. 1 это точка P). Пусть в начальный момент времени манипулятор находится в 3D-пространстве в некотором допустимом положении, определяемом набором углов q_{ic} поворотов в шарнирах манипулятора. Рабочий орган при этом находится в точке P_c . Пусть также в пространстве задана некоторая точка P_d . Задача инверсной кинематики при управлении манипулятором в полуавтоматическом режиме состоит в вычислении углов поворотов Δq_i , перемещающих положение рабочего органа P из точки P_c в точку P_d (или в точку P'_d , наиболее близкую к точке P_d , если точка P_d является недостижимой). При этом на углы поворота $q_i = q_{ic} + \Delta q_i$ могут быть наложены ограничения $q_{i,\min} \leq q_i \leq q_{i,\max}$, $i = 1, \dots, N$. В общем случае данная задача может иметь одно, несколько или вообще не иметь решений. Отметим, что в данной постановке задачи не учитывается ориентация рабочего органа, т. е. нам необходимо управлять только его положением.

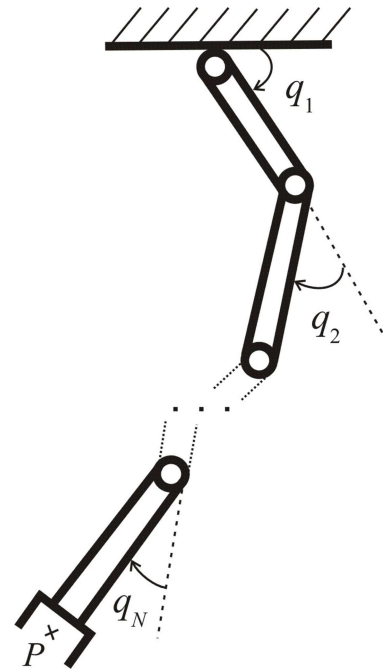


Рис. 1. Кинематическая цепь общего вида

Данную задачу будем решать с помощью эвристического метода покоординатного спуска [7–8]. Суть метода состоит в том, что мы последовательно, в определенном порядке поворачиваем шарниры в сочленениях так, чтобы приблизить текущее положение рабочего органа к желаемому.

Рассмотрим поворот в одном i -м шарнире. Пусть P_i – положение i -го шарнира, а $\bar{n}_i^z$ – вектор оси вращения шарнира. Определим два вектора $\bar{v}_i = P_c - P_i$ и $\bar{w}_i = P_d - P_i$ (рис. 2). Спроецируем эти векторы в плоскость, перпендикулярную оси $\bar{n}_i^z$. Тогда получим

$$\bar{v}'_i = (\bar{v}_i \cdot \bar{n}_i^x) \bar{n}_i^x + (\bar{v}_i \cdot \bar{n}_i^y) \bar{n}_i^y, \quad \bar{w}'_i = (\bar{w}_i \cdot \bar{n}_i^x) \bar{n}_i^x + (\bar{w}_i \cdot \bar{n}_i^y) \bar{n}_i^y, \quad (1)$$

где $\bar{n}_i^x$ и $\bar{n}_i^y$ – взаимно перпендикулярные векторы, лежащие в плоскости.

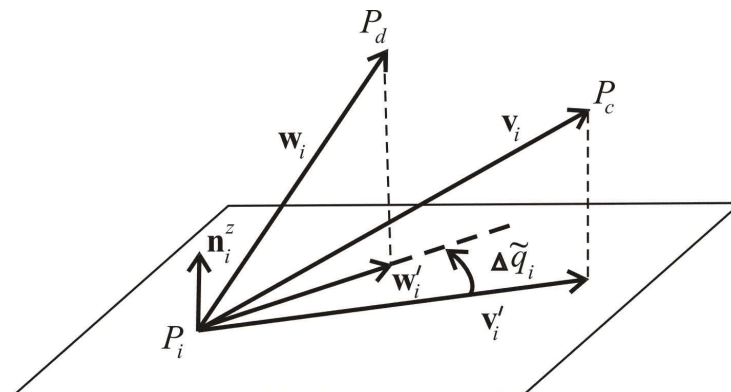


Рис. 2. Поворот в i -м шарнире

Для приближения положения рабочего органа P_c к точке P_d совместим вектор $\vec{v}_i'$ с вектором $\vec{w}_i'$ путем поворота вокруг оси $\vec{n}_i^z$. Данный поворот определяется углом

$$\Delta\tilde{q}_i = \arccos(\vec{v}_i' \cdot \vec{w}_i') \cdot \text{sgn}(\vec{n}_i^z \cdot (\vec{v}_i' \times \vec{w}_i')). \quad (2)$$

При наличии ограничений на q_i вычисленный угол $\Delta\tilde{q}_i$ необходимо скорректировать следующим образом

если $q_i + \Delta\tilde{q}_i < q_{i,\min}$, то

$$\Delta\tilde{q}_i = q_{i,\min} - q_i;$$

если $q_i + \Delta\tilde{q}_i > q_{i,\max}$, то

$$\Delta\tilde{q}_i = q_{i,\max} - q_i.$$

После учета ограничений новый угол и суммарное изменение угла в шарнире определяются как

$$q_i' = q_i + \Delta\tilde{q}_i, \quad q_i = q_i', \quad \Delta q_i' = \Delta q_i + \Delta\tilde{q}_i, \quad \Delta q_i = \Delta q_i'.$$

Метод покоординатного спуска является итерационным, и в нем более предпочтителен обратный обход шарниров по кинематической цепи, т. е. сначала обрабатываются шарниры, ближайшие к рабочему органу. Поворот в каждом шарнире называется итерацией. Процесс начинаем с N -го шарнира. Для каждого i осуществляется поворот в шарнирах $N, N-1, \dots, i$. Если среди этих поворотов для некоторого j угол оказался ненулевой, то поворачиваем j -й шарнир на этот угол и начинаем такой же процесс для $i = N$. Если все углы поворотов в шарнирах $N, N-1, \dots, i$ оказались нулевыми, то переходим на один шарнир вверх, т. е. начинаем процесс с $i = i-1$. Условием окончания итераций является превышение заданного максимального числа итераций или достижение рабочим органом требуемого положения с заданной точностью.

Опишем алгоритм, реализующий метод покоординатного спуска с условием возврата к последнему шарниру. В данном алгоритме вводится переменная q_s , в которой накапливаются модули углов поворота всех шарниров. Если в конце прохода по кинематической цепи величина q_s равна нулю, значит, положение рабочего органа P_d является недостижимым, поэтому необходимо досрочно завершить итерации. Величины ε_1 , ε_2 и ε_3 задают точность проверочных условий: ε_1 предназначена для проверки нулевого значения переменной (безразмерная величина), ε_2 – для расстояния между точками (в сантиметрах), а ε_3 – для углов поворота (в радианах). В данной работе были выбраны $\varepsilon_1 = 10^{-6}$, $\varepsilon_2 = 10^{-2}$ сантиметров, $\varepsilon_3 = 10^{-3}$ радиан.

Ниже приведен описанный алгоритм:

Дано: $MaxIter$, ε_1 , ε_2 и ε_3 .

$k = 0$; $q_i = q_{ic}$; $\Delta q_i = 0$ // k – число итераций

Цикл без условия

$q_s = 0$; // сумма модулей углов поворота всех шарниров

Цикл по шарнирам i от N до 1

$k = k + 1$;

вычисляем векторы $\vec{v}_i'$ и $\vec{w}_i'$ по формулам (1);

вычисляем $\Delta\tilde{q}_i$ по формуле (2);

проверяем ограничения для угла q_i , корректируем $\Delta\tilde{q}_i$ как описано выше;

$q_i = q_i + \Delta\tilde{q}_i$;

$q_s = q_s + |\Delta\tilde{q}_i|$;

если $|\Delta\tilde{q}_i| \leq \varepsilon_1$, то переходим к следующему шагу цикла (т. е. к $i-1$ -му шарниру);

$$\Delta q_i = \Delta q_i + \Delta\tilde{q}_i;$$

поворачиваем i -й шарнир на угол $\Delta\tilde{q}_i$;

вычисляем новое положение P_c рабочего органа;

если $k \geq \text{MaxIter}$, то выход;

если $\|P_c - P_d\| \leq \varepsilon_2$, то выход;

если $i < N$ и $|\Delta\tilde{q}_i| > \varepsilon_3$, то $i = N$.

Конец цикла по i

Если $q_s \leq \varepsilon_1$, то выход.

Конец цикла.

Рассмотренный алгоритм не требует существенных вычислительных затрат, поэтому легко реализуем в масштабе реального времени.

Применение ПД-регулятора в электроприводах. Пропорционально-дифференцирующий регулятор (ПД-регулятор) [9] является простейшей системой регулирования с обратной связью. Объектом регулирования в работе является электропривод в шарнире робота, который управляется путем подачи на него напряжения $u(t)$. Задача регулирования состоит в поддержании заданного значения угла $q^*(t)$ в шарнире. Пусть $q(t)$ текущий угол поворота в шарнире. Тогда $e(t) = q(t) - q^*(t)$ называется величиной рассогласования, или ошибкой.

Формула ПД-регулятора для выходного сигнала в интегральной форме будет иметь вид

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt},$$

где K_p и K_d – коэффициенты усиления пропорциональной и дифференциальной составляющей регулятора.

На рис. 3 представлена схема ПД-регулятора. В данной схеме входным сигналом является величина ошибки $e(t)$, а на выходе вычисляется напряжение $u(t)$. Прямоугольный блок s в схеме является дифференциатором, а треугольные блоки производят умножение на константу.

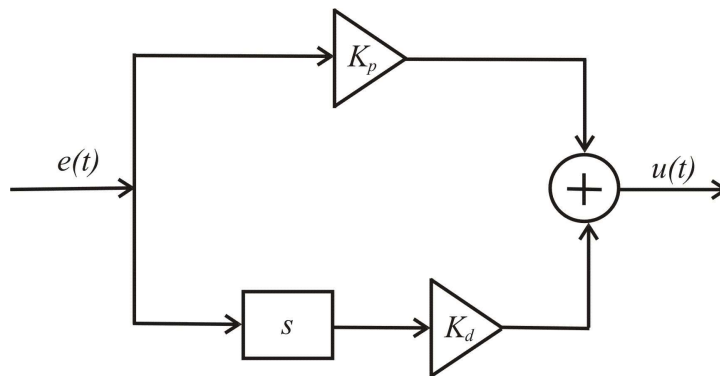


Рис. 3. Схема ПД-регулятора

На практике применяется дискретная форма ПД-регулятора:

$$u(t_n) = K_p e(t_n) + K_d \frac{e(t_n) - e(t_{n-1})}{\Delta t}, \quad (3)$$

где $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ – шаг дискретизации.

Выходной сигнал $u(t_n)$ ограничен по модулю величиной $u_{\max}$. Поэтому вычисленный $u(t_n)$ по формуле (3) необходимо скорректировать следующим образом

если $u(t_n) > u_{\max}$, то $u(t_n) = u_{\max}$;

в противном случае, если $u(t_n) < -u_{\max}$, то $u(t_n) = -u_{\max}$.

Реализация полуавтоматического режима управления роботом в имитационно-тренажерном комплексе. В ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН разработан имитационно-тренажерный комплекс, предназначенный для моделирования движения виртуальных роботов в виртуальном окружении. Данный программный комплекс содержит подсистемы визуализации, динамики и управления. Для реализации полуавтоматического режима используется разработанная технология виртуальных пультов управления и модуль расчета функциональных схем.

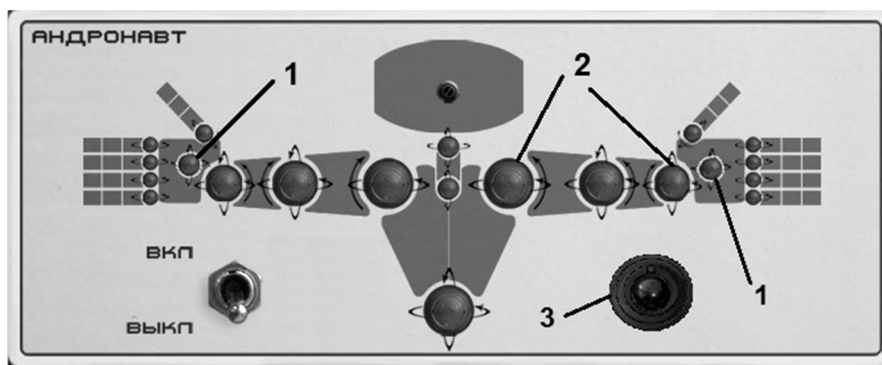


Рис. 4. Виртуальный пульт управления

Виртуальный пульт управления представляет собой схематическое изображение робота, на котором задано расположение шарниров, камер и других управляемых элементов. На рис. 4 показан виртуальный пульт управления антропоморфным роботом, в котором 1 – рабочие органы, 2 – шарниры, 3 – джойстик. Управление с помощью данного пульта осуществляется как в командном, так и в полуавтоматическом режиме. В режиме тренировки оператор тренажера с помощью щелчка мыши на соответствующих элементах пульта может выбрать один или несколько шарниров, либо один рабочий орган, после чего с помощью перемещения трехстепенного виртуального элемента управления типа «Джойстик» управлять движением робота в выбранных шарнирах.

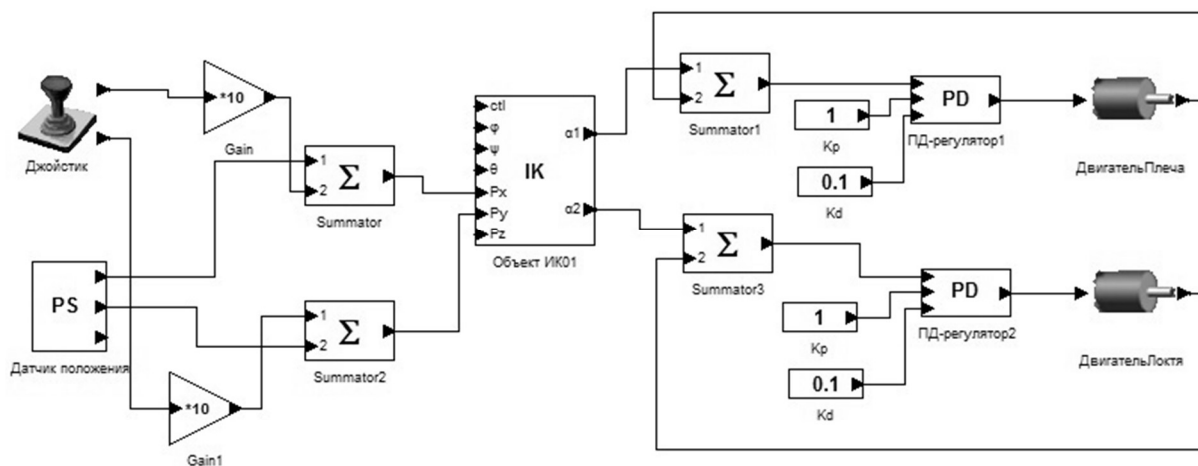


Рис. 5. Функциональная схема управления

Функциональная схема управления представляет собой набор функциональных блоков, соединенных между собой. На вход функциональной схемы поступают управляющие сигналы блоков пульта управления, а на выходе рассчитываются напряжения, подаваемые на электроприводы.

Для реализации полуавтоматического режима управления роботом были разработаны следующие компоненты функциональной схемы: блок датчика положения, блок инверсной кинематики и блок ПД-регулятора. Блок датчика положения предназначен для получения текущего положения рабочего органа, вычисляемого в подсистеме динамики. Блок инверсной кинематики вычисляет методом покоординатного спуска новые углы поворотов в шарнирах, которые передаются в блоки ПД-регуляторов. ПД-регуляторы вычисляют напряжения, подаваемые на электроприводы робота так, чтобы обеспечить повороты двигателей на углы, получаемые из блока инверсной кинематики. На рис. 5 представлена функциональная схема управления плоским двухзвенным манипулятором в полуавтоматическом режиме. В ней блок «Джойстик» передает в функциональную схему сигналы управления от джойстика виртуального пульта, а блок «Датчик положения» передает текущее положение рабочего органа. Функциональная схема вычисляет новое положение рабочего органа, передаваемое в блок «Объект ИК», на выходе которого определяются требуемые углы поворота двигателей. Рассчитанные углы подаются на блоки ПД-регуляторов, которые формируют напряжения на электроприводы. В данной схеме через блоки двигателей реализована обратная связь для углов поворотов двигателей.

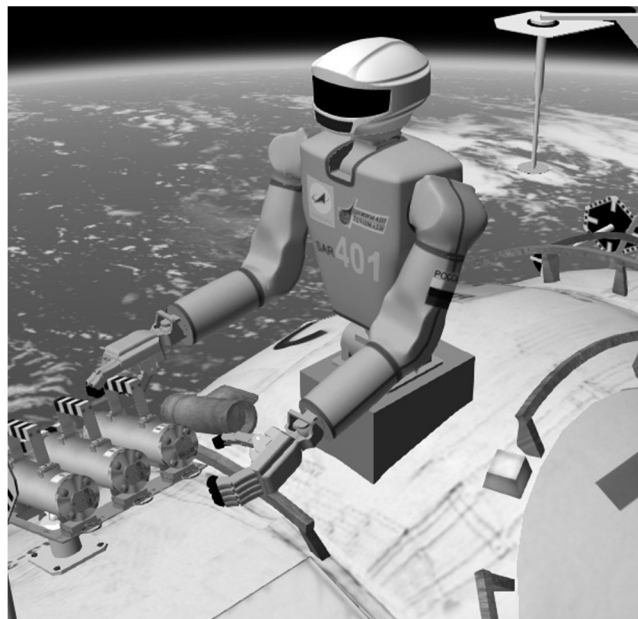


Рис. 6. Захват антропоморфным роботом контейнера

Для апробации предложенных в статье методов управления роботами в полуавтоматическом режиме была рассмотрена модель торсового антропоморфного робота. В качестве технологических операций были выбраны захват роботом объекта и нажатие на кнопку. При этом в качестве рабочего органа была выбрана точка запястья руки без учета движения кисти робота. Проведенные испытания показали, что с помощью полуавтоматического режима быстрее и проще управлять положением кисти руки, чем управлять последовательно каждым приводом по отдельности, чтобы осуществить требуемое движение кисти руки. На рис. 6 представлена операция захвата роботом контейнера Биориска, в которой подведение кисти руки осуществляется в полуавтоматическом режиме, а захват осуществляется включением соответствующих двигателей кисти руки.

Вывод. В работе предложены новые методы полуавтоматического управления роботами на основе виртуальных пультов. Применение метода покоординатного спуска позволяет эффективно решать задачу инверсной кинематики в режиме реального времени. В дальнейшем предложенные методы полуавтоматического управления могут быть усовершенствованы для учета ориентации рабочего органа при решении задачи инверсной кинематики.

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-07-00137.

Литература

1. Юревич Е. И. Основы робототехники. СПб. : БХВ-Петербург, 2010. 360 с.
2. Тимофеев А. Н., Шардыко И. В. Проблемы применения в космосе антропоморфных роботов // Космическая робототехника. 2013. № 1. С. 37–41.
3. Торгашев М. А. Моделирование копирующего режима управления антропоморфным роботом в виртуальной среде // Тр. НИИСИ РАН. 2015. Т. 5. № 2. С. 47–54.
4. Мальцев А. В., Михайлюк М. В. Реализация эргономичного интерфейса управления виртуальной моделью антропоморфного робота с использованием Kinect // Программн. инженерия. 2015. № 10. С. 12–18.
5. Михайлюк М. В., Омельченко Д. В., Страшинов Е. В. Командный и супервизорный режим управления виртуальными роботами // Вестн. кибернетики. 2016. № 4. С. 67–72.
6. Михайлюк М. В., Торгашев М. А. Визуальный редактор и модуль расчета функциональных схем для имитационно-тренажерных комплексов // Програм. продукты и системы. 2014. № 4. С. 10–15.
7. Wang T. L., Chen C. C. A combined optimization method for solving the inverse kinematics problems of mechanical manipulators // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1991. Vol. 7. № 4. P. 489–499.
8. Kenwright B. Inverse kinematics – cyclic coordinate descent (ccd) // Journal of Graphics Tools. 2012. Vol. 16. № 4. P. 177–217.
9. Денисенко В. В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Соврем. технологии автоматизации. 2006. № 4. С. 66–74.