

Методы силового управления манипуляционными роботами в системах виртуального окружения

Е.В. Страшнов, М.В. Михайлюк

Аннотация—В статье рассматривается задача управления виртуальными манипуляционными роботами с обратной связью по силе в системах виртуального окружения. Для ее решения предлагается подход, в котором силовое управление роботом осуществляется на основе показаний виртуальных датчиков сил и методов создания и расчета функциональных схем, состоящих из блоков различного типа. В рамках рассматриваемого подхода силовое управление роботом реализуется путем построения пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятора) с помощью функциональной схемы, в которой используется величина рассогласования между желаемыми и измеряемыми значениями сил и моментов, которые действуют на рабочий орган робота.

Предлагаемые в статье решения реализованы в программном комплексе, предназначенном для моделирования и управления виртуальными роботами. Результаты апробации в этом комплексе на примере управления антропоморфным роботом показали, что с помощью предлагаемых решений можно эффективно выполнять сложные технологические операции, в которых антропоморфный робот взаимодействует с объектами виртуального окружения.

Ключевые слова—манипуляционный робот, обратная связь, датчики, функциональная схема, ПИ-регулятор, системы виртуального окружения.

I. ВВЕДЕНИЕ

Манипуляционный робот [1] представляет собой механическое устройство, состоящее из исполнительных системы в виде одного или нескольких манипуляторов и сенсорной системы, измеряющей параметры внешней среды. Основное предназначение таких роботов состоит в том, чтобы частично или полностью заменить человека при выполнении тяжелых или рутинных работ. В этих работах рабочий орган робота (например, захватное устройство) должен взаимодействовать с объектами внешнего окружения. Примером служат операции сборки, шлифования, зачистки поверхностей и т.д. Для успешного выполнения этих операций необходим контроль (см. [2], [3], [4]) за величиной силы

и момента, с которыми робот воздействует на объект. Мы рассматриваем такие манипуляционные роботы, в которых исполнительными устройствами являются электроприводы, установленные в его сочленениях. Задача силового управления манипуляционным роботом заключается в том, чтобы сформировать напряжения, подаваемые на электроприводы робота, обеспечивающие поддержание заданных значений сил и моментов на его рабочем органе. Наиболее распространенным подходом при решении этой задачи является использование ПИД-регуляторов [5], [6], [7], [8].

В связи с развитием компьютерных технологий и вычислительных средств в настоящее время активно создаются и используются системы виртуального окружения и имитационно-тренажерные комплексы, в которых осуществляется моделирование роботов. Актуальность таких систем объясняется рядом причин. Одна из причин состоит в том, что многие роботы управляются дистанционно с помощью пульта [9], [10], экзоскелета [11] и киберперчаток [12], надеваемых на тело и руки человека. Это приводит к тому, что необходимо обучить человека-оператора навыкам управления роботом. Применение виртуальной модели робота позволяет сократить время такого обучения и, в дальнейшем, снизить риск поломки дорогостоящего робота. Другая причина заключается в том, что на процесс отладки и тестирования разрабатываемых систем управления роботами тратится много времени и усилий прежде, чем их применить на реальном роботе. В свою очередь системы виртуального окружения предоставляет удобное средство для визуальной проверки разрабатываемых методов и алгоритмов, позволяя полностью смоделировать роботом выполнение той или иной технологической операции.

Моделирование управления манипуляционными роботами по силе в системах виртуального окружения является сложной задачей. Это связано с тем, что для симуляции поведения реального робота требуется в реальном времени моделировать динамику многозвенных манипуляторов, электроприводов, датчиков и т.д. В настоящее время существует несколько программных комплексов (симуляторов), предназначенных для моделирования роботов, в частности USARSim [13], Gazebo [14], V-REP [15] и Webots [16]. Анализ этих систем показывает, что, несмотря на наличие в них широких возможностей, актуальным

Статья получена 16 августа 2019.

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

Е.В. Страшнов, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (e-mail: strashnov_evg@mail.ru).

М.В. Михайлюк, доктор физико-математических наук, профессор, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (e-mail: mix@niisi.ras.ru)

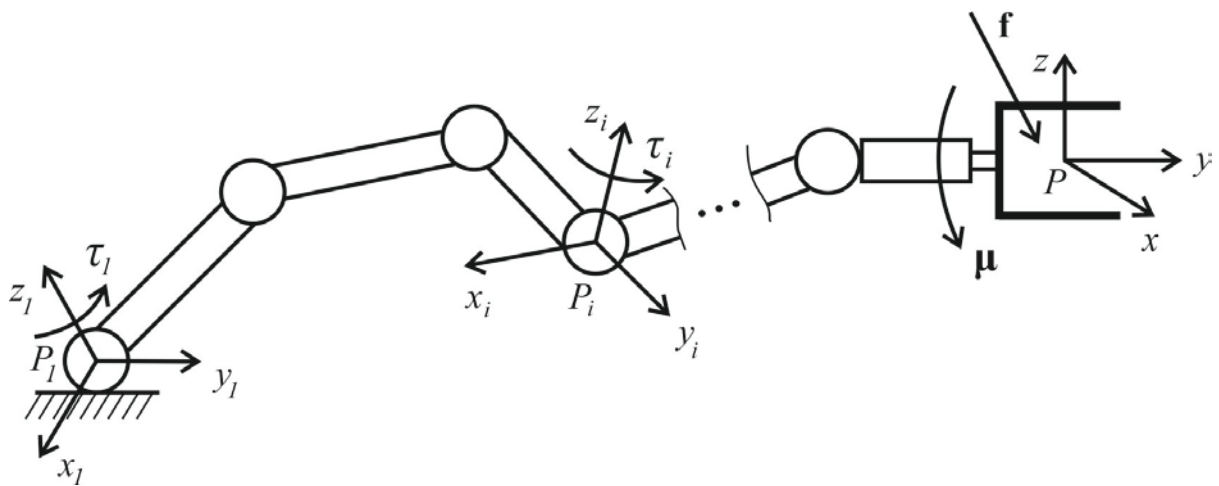


Рис. 1. Структура манипуляционного робота

остается создание удобного интерфейса для управления роботами. В рассматриваемых симуляторах управление роботом осуществляется согласно программе, написанной на языке C/C++ или на языке сценариев. Также стоит отметить, что реализованные в этих системах датчики сил имеют ограниченную функциональность. Например, в симуляторе V-REP датчик силы вычисляет силу только в сочленении робота, в то время как в реальных роботах могут быть использованы датчики, которые вычисляют силы и моменты на рабочем органе робота.

В настоящей работе предлагается новый подход для силового управления манипуляционными роботами в системах виртуального окружения, который основан на технологии создания и расчета функциональных схем. Создание функциональной схемы осуществляется в разработанном редакторе [17], и вся схема представляет собой набор соединенных друг с другом блоков различного типа, включая блоки датчиков и исполнительных устройств. Также предлагаемое решение включает в себя реализацию нового типа виртуальных датчиков сило-моментного оцувствления [18], которые моделируют поведение реальных датчиков. Для этого показания датчиков вычисляются в моделирующем комплексе, образуя силовую обратную связь в схеме управления. Расчет функциональной схемы осуществляется за время, не превышающее 10 мс, чтобы обеспечить масштаб реального времени и адекватное моделирование робота. В рамках предлагаемого подхода в системах виртуального окружения с помощью функциональных схем моделируется ПИ-регулятор силового управления виртуальным манипуляционным роботом. Предлагаемые в статье решения имеют практическое применение в области систем виртуального окружения для автоматического управления виртуальным антропоморфным роботом, которому необходимо взаимодействовать с объектами виртуального окружения. На примере задачи закручивания антропоморфным роботом вентиля на стенде управления в виртуальной модели космического модуля СО1 «Пирс» была проведена апробация, которая показала эффективность и адекватность разработанных методов и алгоритмов

управления роботами.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим манипуляционный робот со структурой в виде кинематической цепи (см. Рис. 1), в которой $N+1$ звеньев робота последовательно соединены шарнирами вращательного типа с одной степенью свободы. Нумерация звеньев робота осуществляется от 0 до N , где первое звено является жестко закрепленным основанием, а последнее звено – рабочим органом (РО) робота (например, хватным устройством). В приведенной нумерации i -ый шарнир соединяет $(i-1)$ -ое и i -ое звено, $i = \overline{1, N}$. Пусть на РО робота действуют внешняя сила $\mathbf{f}(t)$ и момент $\boldsymbol{\mu}(t)$. Управление манипуляционным роботом по силе заключается в обеспечении заданных значений силы $\mathbf{f}_d(t)$ и момента $\boldsymbol{\mu}_d(t)$:

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_d, \quad \boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\mu}_d. \quad (1)$$

Управление движением манипуляционного робота осуществляется с помощью электроприводов, установленных в его сочленениях. Динамика электропривода i -го шарнира подчиняется [19] дифференциальному уравнению следующего вида

$$I_i \dot{\omega}_i = \tau_{e,i} - \tau_{f,i} - \tau_{c,i}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где ω_i – скорость вращения двигателя, I_i – момент инерции двигателя, $\tau_{e,i}$ – крутящий момент, $\tau_{f,i}$ – момент трения в шарнире, $\tau_{c,i}$ – момент, вызванный внешней силой и моментом, которые действуют на РО робота.

Крутящий момент $\tau_{e,i}$ зависит от напряжения U_i , подаваемого на двигатель шарнира, и вычисляется по формуле

$$\tau_{e,i} = M_{s,i} \left(U_i - \frac{\omega_i}{\omega_{idle,i}} \right), \quad (3)$$

где $M_{s,i}$ – пусковой момент, $\omega_{idle,i}$ – скорость холостого хода.

Управление манипуляционным роботом по силе заключается в вычислении напряжений U_i , подаваемых

на электродвигатели, которые обеспечат выполнение равенств (1):

$$U_i = U_i(\mathbf{f}_d, \boldsymbol{\mu}_d). \quad (4)$$

Задачу (4) будем решать с помощью методов прямого управления по датчикам сил. Для этого сначала покажем, как осуществлять преобразования сил от РО к электроприводам робота, а затем опишем предлагаемые методы синтеза силовой обратной связи в зависимости от расположения датчиков.

III. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИЛ И МОМЕНТОВ В МАНИПУЛЯЦИОННОМ РОБОТЕ

Чтобы управлять манипуляционным роботом, необходимо осуществлять преобразования сил и моментов между рабочим органом (РО) и его исполнительными устройствами (электроприводами). Для этого рассмотрим следующие системы координат (СК). Шарниры определяются СК (см. Рис. 1), в которых точки P_i – начала, а x_i , y_i и z_i – их оси, где $i = \overline{1, N}$. Введенные СК основаны на представлении Денавита-Хартенберга [3], в котором вектор \mathbf{n}_i вращения шарнира совпадает с направлением оси z_i . В свою очередь положение и ориентация РО задается СК с началом в точке P и осями x , y и z .

Действие силы \mathbf{f} и момента $\boldsymbol{\mu}$ образуют момент τ_i относительно оси \mathbf{n}_i шарнира. Для вычисления этого момента воспользуемся выражением $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}$, задающим связь между силой и моментом. Тогда искомый момент вычисляется в СК шарнира следующим образом

$$\tau_i = (\mathbf{r}_i \times \mathbf{R}_i^T \mathbf{f} + \mathbf{R}_i^T \boldsymbol{\mu}) \cdot \mathbf{n}'_i, \quad (5)$$

где \mathbf{r}_i – положение РО в СК шарнира, \mathbf{R}_i – матрица перехода из СК шарнира в систему координат РО, $\mathbf{n}'_i = (0, 0, 1)^T$ – ось вращения шарнира в его СК.

Соотношение (5) преобразуется к виду

$$\tau_i = \mathbf{f} \cdot \mathbf{R}_i \mathbf{v}_i + \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{R}_i \mathbf{n}'_i, \quad (6)$$

где $\mathbf{v}_i = \mathbf{n}'_i \times \mathbf{r}_i = (-r_{i,x}, r_{i,y}, 0)^T$.

При выводе было использовано свойство смешанного произведения векторов $\mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = \mathbf{c} \cdot (\mathbf{a} \times \mathbf{b})$ и выражение $\mathbf{a} \cdot \mathbf{R}^T \mathbf{b} = \mathbf{R} \mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$.

Соотношение (6) выражает момент τ_i в i -м шарнире робота через силу \mathbf{f} и момент $\boldsymbol{\mu}$, действующих на РО робота.

IV. СИЛОВАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

A. Силовая обратная связь в шарнирах робота

Рассмотрим реализацию силовой обратной связи по моментам в сочленениях манипуляционного робота. В этом случае предполагается, что в i -м шарнире робота установлен датчик, вычисляющий момент $\tau_{c,i}$ на выходном вале двигателя. Тогда задача управления состоит в обеспечении заданного момента $\tau_{d,i}$. Этот

момент может быть получен из формулы (6) с подстановкой заданной силы \mathbf{f}_d и момента $\boldsymbol{\mu}_d$, которые должны действовать на РО робота.

Для решения этой задачи применим пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор). В нем управляющий выходной сигнал формируется из пропорциональной и интегральной составляющих, выбираемых относительно величины рассогласования $e_{\tau,i}(t) = \tau_{d,i}(t) - \tau_{c,i}(t)$ между заданным и текущим значением момента в i -м шарнире робота. Управляющим сигналом в рассматриваемом случае будет момент $\tau_{e,i}$, который сформируем в виде суммы заданного момента $\tau_{d,i}$ с пропорциональной и интегральной составляющими ПИ-регулятора:

$$\tau_{e,i}(t) = \tau_{d,i}(t) + k_p e_{\tau,i}(t) + k_I \int e_{\tau,i}(t) dt, \quad (7)$$

где $k_p > 0$ и $k_I > 0$ – задаваемые коэффициенты усиления пропорциональной и интегральной составляющей регулятора. Регулятор (7) построен таким образом, что при стремлении $e_{\tau,i}(t) \rightarrow 0$ будет $\tau_i(t) \rightarrow \tau_{d,i}(t)$.

На практике применяется дискретная форма ПИ-регулятора. Для этого в (7) воспользуемся формулой трапеции [20] для численного интегрирования. Тогда получим

$$\tau_{e,i}(t_n) = \tau_{d,i}(t_n) + k_p e_{\tau,i}(t_n) + k_I \sum_{k=1}^n \frac{e_{\tau,i}(t_{k-1}) + e_{\tau,i}(t_k)}{2} \Delta t_k,$$

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

Подставляя $\tau_{e,i}(t_n)$ в формулу (3), получим

$$U_i = \frac{\omega_i}{\omega_{idle,i}} + \frac{1}{M_{s,i}} (\tau_{d,i}(t_n) + k_p e_{\tau,i}(t_n) + k_I \sum_{k=1}^n \frac{e_{\tau,i}(t_{k-1}) + e_{\tau,i}(t_k)}{2} \Delta t_k). \quad (8)$$

В формуле (8) моменты шарниров $\tau_{d,i}(t_n)$ выражаются через целевые значения силы $\mathbf{f}_d(t_n)$ и момента $\boldsymbol{\mu}_d(t_n)$ в соответствии с соотношением (6).

B. Силовая обратная связь на рабочем органе

Рассмотрим реализацию силовой обратной связи на РО манипуляционного робота. В этом случае используются показания шестикомпонентного запястного датчика силы, вычисляющего силу \mathbf{f}_c и момент $\boldsymbol{\mu}_c$. Задача управления заключается в том, чтобы обеспечить целевые значения \mathbf{f}_d и $\boldsymbol{\mu}_d$.

Пусть $\mathbf{e}_f(t) = \mathbf{f}_d(t) - \mathbf{f}_c(t)$ и $\mathbf{e}_\mu(t) = \boldsymbol{\mu}_d(t) - \boldsymbol{\mu}_c(t)$ – векторы невязок по силе и моменту. Тогда, аналогично (7) сформируем ПИ-регулятор для $\mathbf{f}_d(t)$ и $\boldsymbol{\mu}_d(t)$ в следующем виде

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{f}_d(t) + \mathbf{K}_{f,p} \mathbf{e}_f(t) + \mathbf{K}_{f,I} \int \mathbf{e}_f(t) dt; \quad (9)$$

$$\boldsymbol{\mu}(t) = \boldsymbol{\mu}_d(t) + \mathbf{K}_{\mu,p} \mathbf{e}_\mu(t) + \mathbf{K}_{\mu,I} \int \mathbf{e}_\mu(t) dt, \quad (10)$$

где $\mathbf{K}_{f,p}$, $\mathbf{K}_{f,I}$, $\mathbf{K}_{\mu,p}$, $\mathbf{K}_{\mu,I}$ – положительно опреде-

ленные матрицы коэффициентов усиления пропорциональной и интегральной составляющих. Для простоты эти матрицы выбираются в диагональной форме.

Дискретная форма ПИ-регулятора (9) примет вид

$$\mathbf{f}(t_n) = \mathbf{f}_d(t_n) + \mathbf{K}_{f,p} \mathbf{e}_f(t_n) + \mathbf{K}_{f,i} \sum_{k=1}^n \frac{\mathbf{e}_f(t_{k-1}) + \mathbf{e}_f(t_k)}{2} \Delta t_k. \quad (11)$$

Аналогично, дискретная форма ПИ-регулятора (10) будет иметь вид

$$\boldsymbol{\mu}(t_n) = \boldsymbol{\mu}_d(t_n) + \mathbf{K}_{\mu,p} \mathbf{e}_\mu(t_n) + \mathbf{K}_{\mu,i} \sum_{k=1}^n \frac{\mathbf{e}_\mu(t_{k-1}) + \mathbf{e}_\mu(t_k)}{2} \Delta t_k. \quad (12)$$

Подставляя силу $\mathbf{f}(t_n)$ и момент $\boldsymbol{\mu}(t_n)$ из (11) и (12) в (6), получим момент $\tau_{d,i}(t_n)$. Выражая напряжение из (3) по моменту $\tau_{d,i}(t_n)$, получим

$$U_i(t_n) = \frac{\omega_i(t_n)}{\omega_{idle,i}} + \frac{\tau_{d,i}(t_n)}{M_s} = \frac{\omega_i(t_n)}{\omega_{idle,i}} + \frac{1}{M_{s,i}} (\mathbf{f}(t_n) \cdot \mathbf{R}_i \mathbf{v}_i + \boldsymbol{\mu}(t_n) \cdot \mathbf{R}_i \mathbf{n}_i'). \quad (13)$$

Соотношения (8) и (13) выражают закон управления (4) для двух случаев расположения датчиков силомоментного очувствления.

V. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Для реализации управления манипуляционным роботом с применением полученных регуляторов (8) и (13) в работе была задействована технология расчета и построения функциональных схем. Функциональная схема определяет алгоритм управления роботом и состоит из блоков различного типа, соединенных друг с другом. Каждый блок функциональной схемы выполняет свойственную ему функцию по обработке сигналов, поступающих на его входы и формированию выходных сигналов на его выходах. Создание и редактирование схем управления осуществляется в специальном разработанном редакторе. Этот редактор поддерживает обширную библиотеку блоков

(логические, арифметические, тригонометрические, цифровые, ТАУ и т.д.), что позволяет создавать различные по сложности схемы.

Управление роботом осуществляется согласно созданной функциональной схеме, в которой по входным сигналам (показания блоков датчиков и т.д.) выполняется расчет выходных сигналов (напряжений), подаваемых на исполнительные устройства робота (электроприводы). На рис. 2 представлен интерфейс созданного редактора функциональных схем и пример схемы, реализующей ПИ-регулятор вида (8). Рассмотрим работу этой схемы более подробно.

На вход схемы поступают необходимые значения силы \mathbf{f}_d и момента $\boldsymbol{\mu}_d$, показания $\tau_{c,i}$ датчика момента в шарнире и угловая скорость ω_i электродвигателя. В подсхеме "ForceTransform" по силе \mathbf{f}_d и моменту $\boldsymbol{\mu}_d$ выполняется расчет момента $\tau_{d,i}$ в соответствии с соотношением (6). Вычисленный момент суммируется в блоке сумматора со знаком "e_tau" со значением показания датчика $\tau_{c,i}$, взятого с обратным знаком, что формирует на выходе блока невязку $e_{\tau,i}$. Полученная невязка используется в формировании регулятора (8) с параметрами $k_p = 0.2$ и $k_i = 0.1$ где для интегрирования используется блок интегратора с перезагрузкой "ResettingIntegral", который с заданным интервалом (например, 5 секунд) обнуляет накопленную интегральную сумму. На выходе схемы вычисляется напряжение U_i , подаваемое на электродвигатель сочленения робота, имеющий пусковой момент $M_{s,i} = 200$ Н*м и скорость холостого хода $\omega_{idle,i} = 1.047$ рад/с.

VI. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предложенные в статье методы и алгоритмы управления манипуляционными роботами с применением обратной связи по силе были реализованы в комплексе виртуального окружения, разработанном в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. Этот программный комплекс состоит из

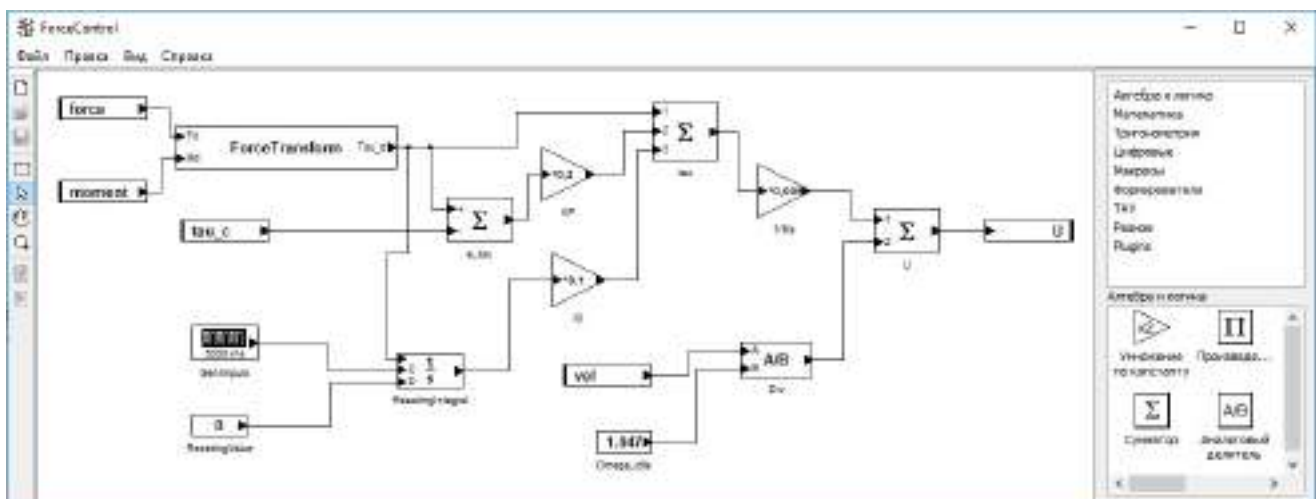


Рис. 2. Схема регулятора в редакторе функциональных схем

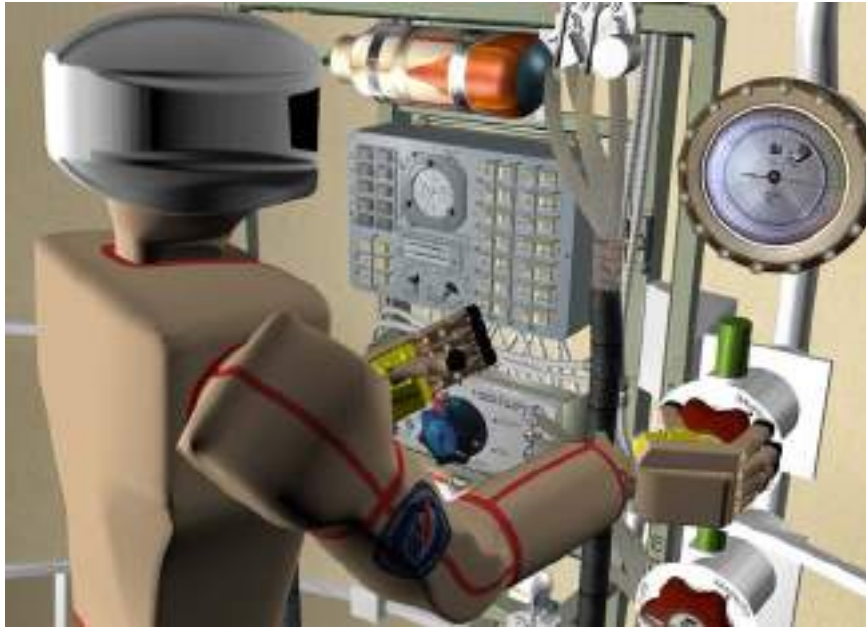


Рис. 3. Поворот вентиля с помощью антропоморфного робота

подсистем управления, динамики и визуализации. В подсистему управления загружаются созданные в редакторе функциональные схемы, и на основе модуля вычисления управляющих сигналов выполняется их расчет. В подсистемы динамики и визуализации загружаются подготовленные в системе компьютерного моделирования 3ds Max трехмерные модели роботов и окружающей обстановки. Взаимодействие рассматриваемых подсистем осуществляется путем передачи данных между ними. Показания датчиков силы вычисляются в подсистеме динамики и передаются в подсистему управления. Согласно созданной функциональной схеме, подсистема управления манипуляционным роботом выполняет расчет управляющих сигналов (напряжений) и передает их в подсистему динамики. По полученным управляющим сигналам подсистема динамики за время, не превышающее 10 мс, рассчитывает новые координаты (положения и ориентации) виртуальных объектов. Эти координаты передаются в подсистему визуализации, которая осуществляет рендеринг виртуальной сцены. Весь цикл расчетов занимает не более 40 мс, что позволяет осуществлять моделирование в масштабе реального времени.

Для апробации разработанных методов и алгоритмов управления по силе в работе был задействован торсовый антропоморфный робот космического назначения. В качестве виртуальной сцены была выбрана модель космического модуля СО1 «Пирс», содержащая приборную панель и другие органы управления. Для этой сцены рассматривалась технологическая задача, в которой антропоморфному роботу необходимо повернуть вентиль системы шлюзования космического модуля (см. Рис. 3) на заданный угол. Управление роботом осуществлялось в два этапа. Первый этап состоял в том, чтобы подвести кисть руки к вентилю и сжать пальцы. Для этого была рассмотрена задача инверсной кинематики, согласно которой необходимо

определить углы поворотов в сочленениях робота, переводящие РО (кисть руки) в заданную СК. Для решения этой задачи был задействован метод покоординатного спуска, в котором полученные углы поворотов в сочленениях обеспечивались путем синтеза ПД-регулятора [10]. Второй этап состоял в том, чтобы робот повернул вентиль. Для этого был задействован закон управления (13) с реализацией обратной связи по показаниям датчика силы, установленного на кисти руки робота. Целевыми параметрами управления были выбраны проекции силы $f_{d,z}$ и момента $\mu_{d,z}$, где z – это ось вращения вентиля. С помощью такой последовательности действий антропоморфный робот смог повернуть вентиль на заданный угол, что подтверждает применимость предлагаемого решения для управления роботом по силе.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была рассмотрена задача силового управления манипуляционными роботами в системах виртуального окружения. Для ее решения был предложен подход, в рамках которого управление виртуальным роботом осуществляется согласно функциональной схеме, которая реализует ПИ-регулятор с обратной связью по показаниям датчиков сил. Преимущество предложенного подхода заключается в том, что представленное в виде функциональной схемы управление роботом вида (8) и (13) не зависит от динамической модели робота. Это позволяет строить универсальные системы управления, в которых задействована только динамика электроприводов робота. В дальнейшем предполагается применение предложенных решений для реализации позиционно-силового управления роботом.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Е.И. Юревич, *Основы робототехники*. 2-е изд., перераб. и доп. Спб.: БХВ-Петербург, 2005.

- [2] B. Siciliano and L. Villani, *Robot force control*. Norwell, MA: Kluwer, 1999.
- [3] M.W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot dynamics and control*. John Wiley & Sons, 2008.
- [4] R. Murray, Z. Li, and S. Sastry, *A mathematical introduction to robotic manipulation*. CRC Press, 1994.
- [5] I. Cervantes, and J. Alvarez-Ramirez, "On the PID tracking control of robot manipulators," *Syst. Control Lett.*, vol. 42, pp. 37-46, 2001.
- [6] H. Vicente, H. Ayala, and D. S. Coelho, "Tuning of PID controller based on a multiobjective genetic algorithm applied to a robotic manipulator," *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 10, pp. 8968-8974, 2012.
- [7] W. M. Tang, G. Chen, and R. D. Lu, "A modified fuzzy PI controller for a flexible-joint robot arm with uncertainties," *Int. J. Fuzzy Sets Syst.*, vol. 118, pp. 109-119, 2001.
- [8] J. Moreno-Valenzuela and V. Santibanez, "Robust saturated PI joint velocity control for robot manipulators," *Asian J. Control*, vol. 15, no. 1, pp. 64-79, 2013.
- [9] М.В. Михайлюк, Д.В. Омельченко, Е.В. Страшнов, "Командный и супервизорный режимы управления виртуальными роботами," *Вестник кибернетики*, № 4, стр. 79-84, 2016.
- [10] Е.В. Страшнов, М.В. Михайлюк, "Моделирование полуавтоматического режима управления манипуляционными роботами в системах виртуального окружения," *Вестник кибернетики*, № 4, стр. 191-198, 2017.
- [11] М.А. Торгашев, "Моделирование копирующего режима управления антропоморфным роботом в виртуальной среде," *Труды НИИСИ РАН*, т. 5, № 2, стр. 47-54, 2015.
- [12] C.W. Borst, and A.P. Indugula, "Realistic virtual grasping". *IEEE Virtual Reality*, 2005.
- [13] S. Carpin, M. Lewis, J. Wang, S. Balakirsky, and C. Scrapper, "USARSim: A robot simulator for research and education," in *Proc. IEEE Conf. Robotics Automation*, Piscataway, NJ, 2007, pp. 1400-1405.
- [14] N. Koenig and A. Howard, "Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, Sep 2004, pp. 2149-2154.
- [15] E. Rohmer, S. P. N. Singh, and M. Freese, "V-REP: A versatile and scalable robot simulation framework," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, Tokyo, Japan, 2013, pp. 1321-1326.
- [16] O. Michel, "Webots: Professional mobile robot simulation," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 39-42, 2004.
- [17] М.В. Михайлюк, М.А. Торгашев, "Визуальный редактор и модуль расчета функциональных схем для имитационно-тренажерных комплексов," *Программные продукты и системы*, № 4, стр. 10-15, 2014.
- [18] М.В. Михайлюк, Е.В. Страшнов, Д.М. Логинов, "Моделирование датчиков в системах виртуального окружения," *Труды НИИСИ РАН*, т. 8, № 2, стр. 70-76, 2018.
- [19] Е.В. Страшнов, М.А. Торгашев, "Моделирование динамики электроприводов виртуальных роботов в имитационно-тренажерных комплексах," *Мехатроника, автоматизация, управление*, т. 17, № 11, стр. 762-768, 2016.
- [20] А.А. Самарский, А.В. Гулин, *Численные методы*. М.: Наука, 1989, 432 с.

Methods for robotic manipulator force control in virtual environment systems

E.V. Strashnov, M.V. Mikhaylyuk

Abstract—The paper considers the task of virtual robotic manipulator control with force feedback in virtual environment systems. To solve it, an approach is proposed in which the robot force control is based on the readings of virtual force sensors and the methods for calculating and constructing functional diagrams consisting of various type blocks. Within the framework of this approach the robot force control is realized by constructing a proportional-integral controller (PI controller) with the help of a functional diagram regarding the residual value between the desired and measured values of forces and moments that act on the robot end effector.

The solutions proposed in the paper are implemented in a software package designed for simulation and control of virtual robots. The approbation results in this complex on the example of anthropomorphic robot control have shown that with the help of the proposed solutions, it is possible to effectively perform complex technological operations in which an anthropomorphic robot interacts with objects of the virtual environment.

Keywords—robotic manipulator, feedback, sensors, functional scheme, PI controller, virtual environment systems.

REFERENCES

- [1] E.I. Yurevich, *Basics of Robotics*. 2nd ed. Saint Petersburg: BHV, 2005.
- [2] B. Siciliano and L. Villani, *Robot force control*. Norwell, MA: Kluwer, 1999.
- [3] M.W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot dynamics and control*. John Wiley & Sons, 2008.
- [4] R. Murray, Z. Li, and S. Sastry, *A mathematical introduction to robotic manipulation*. CRC Press, 1994.
- [5] I. Cervantes, and J. Alvarez-Ramirez, "On the PID tracking control of robot manipulators," *Syst. Control Lett.*, vol. 42, pp. 37-46, 2001.
- [6] H. Vicente, H. Ayala, and D. S. Coelho, "Tuning of PID controller based on a multiobjective genetic algorithm applied to a robotic manipulator," *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 10, pp. 8968–8974, 2012.
- [7] W. M. Tang, G. Chen, and R. D. Lu, "A modified fuzzy PI controller for a flexible-joint robot arm with uncertainties," *Int. J. Fuzzy Sets Syst.*, vol. 118, pp. 109–119, 2001.
- [8] J. Moreno-Valenzuela and V. Santibanez, "Robust saturated PI joint velocity control for robot manipulators," *Asian J. Control*, vol. 15, no. 1, pp. 64–79, 2013.
- [9] M.V. Mikhaylyuk, D.V. Omelchenko, and E.V. Strashnov, "Command and supervisory modes for virtual robot control," *Proceeding in cybernetics*, No. 4, pp. 79-84, 2016.
- [10] E.V. Strashnov, M.V. Mikhaylyuk, "Simulation of semi-automatic control of manipulator robots in virtual environment systems," *Proceeding in cybernetics*, No. 4, pp. 191-198, 2017.
- [11] M.A. Torgashev, "Modeling of anthropomorphic robots' copying control in a virtual environment," *Proceedings of NIISI RAS*, Vol. 5, No. 2, pp. 47-54, 2015.
- [12] C.W. Borst, and A.P. Indugula, "Realistic virtual grasping". *IEEE Virtual Reality*, 2005.
- [13] S. Carpin, M. Lewis, J. Wang, S. Balakirsky, and C. Scrapper, "USARSim: A robot simulator for research and education," in *Proc. IEEE Conf. Robotics Automation*, Piscataway, NJ, 2007, pp. 1400–1405.
- [14] N. Koenig and A. Howard, "Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, Sep 2004, pp. 2149–2154.
- [15] E. Rohmer, S. P. N. Singh, and M. Freese, "V-REP: A versatile and scalable robot simulation framework," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, Tokyo, Japan, 2013, pp. 1321–1326.
- [16] O. Michel, "Webots: Professional mobile robot simulation," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 39–42, 2004.
- [17] M.V. Mikhaylyuk, and M.A. Torgashev, "The visual editor and calculation module of block diagrams for simulation and training complexes," *Software products and systems*, No. 4, pp. 10-15, 2014.
- [18] M.V. Mikhaylyuk, E.V. Strashnov, and D.M. Loginov, "Sensors simulation in virtual environment systems," *Proceedings of NIISI RAS*, Vol. 8, No. 2, pp. 70-76, 2018.
- [19] E.V. Strashnov, and M.A. Torgashev, "Simulation of actuator dynamics virtual robots in training complexes," *Mechatronics, automation, control*, Vol. 17, No. 11, pp. 762-768, 2016.
- [20] A.A. Samarskiy, and A.V. Gulin, *Numerical methods*. Moscow: Science, 1989, 432 p.