

Е. А. Купцов

**ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
УПРАВЛЕНИЯ ДВУРУКИМ
МАНИПУЛЯЦИОННЫМ РОБОТОМ**

Рассмотрена проблема управления двурукими манипуляционными роботами. Выделен класс задач, решение которых необходимо для практики, и предложен новый метод управления, сочетающий возможности оператора и робототехнической системы. Этот способ управления расширяет понятие полуавтоматической системы и существенно облегчает функции оператора. Приведены примеры использования предложенного метода при решении задач переноса предметов двумя манипуляторами и отвинчивания резьбового соединения, а также некоторые результаты использования предложенного метода для управления двуруким манипуляционным роботом, разработанным в НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

E-mail: upewg@yandex.ru

Ключевые слова: *манипуляционный робот, полуавтоматическая система, двурукая система, дистанционное управление, манипулятор, полуавтоматический режим управления.*

Манипулирование предметами сложной формы без участия человека обычно требует применения двуруких манипуляционных систем. Однако значительное число степеней подвижности существенно усложняет управление ими в реальном масштабе времени. Особенно острой проблема управления становится в тех случаях, когда помимо положения манипулятора необходимо контролировать величину усилия, с которым он воздействует на объект. Как правило, манипуляторы работают по программе: движение выполняется по последовательности заранее запомненных положений либо применяются специальные языки программирования манипуляторов. При этом обычно не учитываются силовые нагрузки на манипулятор и объект, что необходимо для удержания объекта двумя «руками» и манипулирования им в пространстве.

В настоящее время разработаны различные варианты двуруких манипуляционных роботов, предназначенных для решения сложных задач. Так, в немецком аэрокосмическом центре DLR был создан робот Justin [1–2] (рис. 1). Он представляет собой человекоподобную систему из установленных на силовом торсе двух манипуляторов с семью степенями подвижности (DLR-Lightweight-Robot-III) с четырехпальцевыми 12-степенными антропоморфными схватами на концах (DLR Hand-II). Этот робот был разработан для исследований в

области двуруких робототехнических систем и способен выполнять функции сервисного робота широкого назначения. Кинематика робота позволяет брать предметы двумя манипуляторами с пола и с высоты до 2 м. Особенностью робота является наличие датчиков моментов в сочленениях манипуляторов, что позволяет после соответствующих преобразований контролировать силы и моменты реакции на схватах. На силовом торсе установлена «голова», представляющая собой платформу с двумя степенями подвижности, на которой размещены система стереозрения и лазерный дальномер.

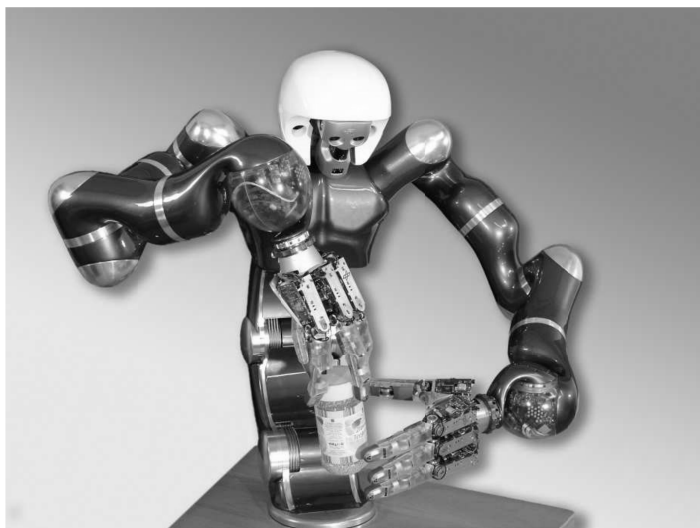


Рис. 1. Внешний вид двурукого манипуляционного робота Justin

Робот позволяет выполнить захват, перемещение и вращение предметов, а также работать с резьбовым соединением. В качестве теста, поясняющего возможности силовой обратной связи, робот способен удерживать между схватами обеих «рук» три футбольных мяча с использованием информации о силе их взаимного прижатия.

Управление роботом осуществляется по заранее написанной программе, а также в режиме командного управления. В последнем случае оператор задает роботу последовательность действий, например: захватить объект, переместить, положить и т. п. Система управления последовательно решает поставленные подзадачи.

Недостатком системы командного управления роботом является сложность задачи манипулирования двумя «руками» объектов неправильной формы. Поэтому в нештатных операциях целесообразно участие человека-оператора, который управлял бы работой робота в режиме реального времени. В связи с этим возникла задача разработки системы полуавтоматического управления двуруким манипуляционным роботом.

Двурукий робот МГТУ им. Н.Э. Баумана. В НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан двурукий манипуляционный робот [3] (рис. 2), предназначенный для расснаряжения взрывоопасных предметов в тех случаях, когда требуется работа двумя «руками» робота одновременно. Таким образом, основная задача робота состоит в выполнении работ, представляющих опасность для человека. Наиболее частыми операциями, выполняемыми роботом, являются захват и перемещение объектов, а также вспомогательные операции, например разборка взрывоопасных объектов. Робот представляет собой мобильную платформу, на которой установлена двурукая манипуляционная система (см. рис. 2). Мобильная платформа передвигается по помещению между рабочими местами, ориентируясь по металлической полосе с помощью индуктивных датчиков. Металлическая полоса установлена по специальному маршруту, проходящему между всеми рабочими местами помещения. Для обеспечения четкого позиционирования на рабочем месте робот стыкуется посредством специального блока причаливания, который обеспечивает надежное соединение с конструкцией рабочего места.

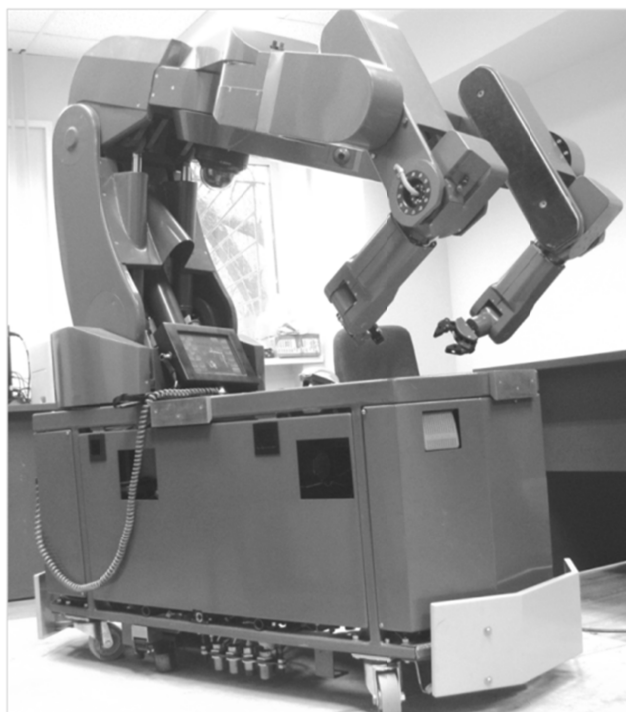


Рис. 2. Внешний вид двурукого мобильного робота, разработанного в НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Манипуляционная система состоит из двух шестистепенных манипуляторов, установленных на модуле раздвоения, перемещаемом трехстепенным силовым гидравлическим манипулятором. Система

управления позволяет работать как отдельными манипуляторами, так и одновременно двумя «руками». Каждый манипулятор имеет специальный пенал, в который могут «складываться» его выходные звенья и их схваты. Работы с небольшими предметами ведутся с помощью схватов манипуляторов, а большие тяжелые предметы зажимаются между пеналами манипуляторов и перемещаются базовым манипулятором [3], [6]. На рабочих поверхностях пеналов установлены датчики усилия, благодаря которым сжатие крупногабаритных объектов осуществляется с заданной силой. Блок системы управления установлен на борту робота. Все электроприводы манипуляторов подключены к общей CAN-шине.

Созданная ранее система управления роботом работает в автоматическом режиме. Программа робота состоит из последовательных команд перемещения манипуляторов между отдельными положениями, заданными оператором. Программа включает также перемещения мобильной платформы робота между рабочими местами. На исходном рабочем месте объект захватывается и устанавливается на мобильную платформу, а при достижении заданного рабочего места – устанавливается на него по заданной программе. За ходом выполнения программы оператор следит с поста управления через стационарную систему видеонаблюдения, а также с помощью видеокамер, установленных на борту робота: на модуле раздвоения и на схватах манипуляторов.

При возникновении нештатной ситуации, а также в случае необходимости работы с нестандартным объектом оператор управляет роботом вручную с помощью пульта управления в системе координат мобильной платформы или в системе координат каждого схвата манипуляторов [6].

В режиме управления захватом крупногабаритных тяжелых предметов «Гиперсхват» схваты манипуляторов убираются в защитные пеналы, а объект зажимается между губок пеналов. Этот режим используется для транспортировки тяжелых крупногабаритных объектов. Однако из-за того, что при работе в данном режиме используются лишь три степени подвижности, обеспечивается перемещение объекта только в цилиндрической системе координат относительно основания манипуляционной системы без изменения его ориентации.

Возможен также режим осмотра объекта, зажато в схвате одного манипулятора, с помощью видеокамеры, установленной в схвате другого манипулятора. В этом режиме оператор с помощью джойстика задает движение манипулятора с видеокамерой, который совершает соответствующие движения, перемещая по сферической поверхности заданного заранее радиуса видеокамеру и постоянно ориентируя ее на объект. Данный режим позволяет рассмотреть незнакомый объект со всех сторон.

Центральный пульт управления представляет собой переносное устройство. Выбор и запуск программ осуществляется с помощью графического интерфейса пользователя, который отображается на экране пульта управления, а ручное управление выполняется посредством джойстиков пульта.

Существующие проблемы и постановка задачи. В процессе опытной эксплуатации был выделен класс задач, решение которых в реальном масштабе времени с помощью имеющегося манипуляционного робота и его системы управления невозможно. Так, в режиме «Гиперсхват» при кантовании или перемещении объекта возможны деформации звеньев и, как следствие, изменение усилия сжатия, в результате чего объект может выпасть. Кроме того, данный режим имеет малое количество степеней подвижности, участвующих в перемещении и кантовании объекта, что приводит к ограничению возможности изменения ориентации объекта и уменьшению рабочей зоны манипулятора.

При расснаряжении взрывоопасных объектов часто приходится выполнять отвинчивание резьбовых соединений. При этом оператор в реальном масштабе времени зажимает разнимаемые детали в схватах манипуляторов и вращает одну деталь относительно другой. За счет хода резьбы на манипуляторы начинает действовать усилие, направленное по оси соединения, которое при превышении допустимых значений может вывести манипулятор из строя. Частично проблему можно решить путем перехватывания отвинчиваемой детали, однако такой процесс сложен для оператора.

При работе с нестандартными объектами в экстренных ситуациях нет возможности обучения робота путем предварительного выполнения операций с ними. В то же время управление манипуляторами в ручном режиме приводит к быстрому утомлению оператора из-за большого количества контролируемых параметров и, как следствие, к совершению ошибок. Поэтому автором было предложено использование для управления в ручном режиме беспроводных рукоятей [4]. Такой способ позволяет управлять одновременно двумя манипуляторами по положению, однако человек в этом случае не получает необходимой информации о силах реакции, действующих на схваты. Построение копирующих систем двустороннего действия приводит к значительному удорожанию системы и потери ее мобильности из-за громоздкости конструкции задающих устройств.

Таким образом, необходимо обеспечить управление двуруким манипуляционным роботом в масштабе реального времени при работе с заранее неизвестными объектами как в командном режиме, так и в контурном по положению или по скорости с визуальной обратной связью. При этом оператор должен быть освобожден от контроля сил реакции; сигналы управления, формируемые оператором, должны

автоматически корректироваться в зависимости от сил реакции на выходных звеньях манипуляторов.

Полуавтоматическая система управления. Под полуавтоматической системой мы понимаем такую систему управления, в которой человек-оператор при управлении роботом в реальном масштабе времени выполняет лишь функции задания движения. Коррекция движения с учетом действующих на манипулятор сил выполняется системой управления манипулятором. Оператор задает отдельные подзадачи (расчет траектории, усилия и т. п.), а также требуемое положение или вектор скорости объекта манипулирования.

На рис. 3 приведена функциональная схема полуавтоматической системы управления роботом, представляющая собой замкнутую систему. Она содержит датчики значений обобщенных координат, датчики усилий и моментов реакции на выходном звене (на схватах манипуляторов), систему технического зрения и систему дальномеров. Данные от всех датчиков поступают в блок управления манипуляционным роботом, в то время как оператору предоставляется информация только о положении манипулятора.

Задачи, которые решаются с помощью двурукой манипуляционной системы, как правило, можно разбить на три этапа [5]:

- этап 1 – захват двумя «руками» объекта на рабочей поверхности;
- этап 2 – выполнение той или иной операции над объектом, включая его перемещение, разборку, осмотр и тому подобное с использованием обеих «рук»;
- этап 3 – установка объекта, или его фрагментов, на рабочую поверхность.

Для выполнения этапа 1 необходима система технического зрения, позволяющая распознавать тип объекта и его положение в абсолютной системе координат, в результате чего можно определить наилучший способ его захвата. При наличии в рабочей области манипулятора нескольких объектов оператору будет предложено выбрать объект. Система сама планирует траекторию движения выходных звеньев манипулятора таким образом, чтобы обеспечить захват объекта. Сила, с которой манипуляторы зажимают объект, может быть выбрана несколькими способами. Если нет опасности повреждения объекта, то он зажимается между губок с датчиками проскальзывания. Сила сжатия постепенно увеличивается до тех пор, пока датчики проскальзывания не перестанут показывать смещение объекта относительно губок. В более сложных ситуациях оператор заранее задает максимальное значение усилия сжатия.

На этапе 2 выполняются операции с зажатым в схвате предметом в соответствии с поставленной задачей [7].

На этапе 3 с помощью системы стереозрения и дальномеров аналогично тому, как это делается на этапе 1, определяется плоскость, на которую необходимо установить предмет. Силомоментные датчики

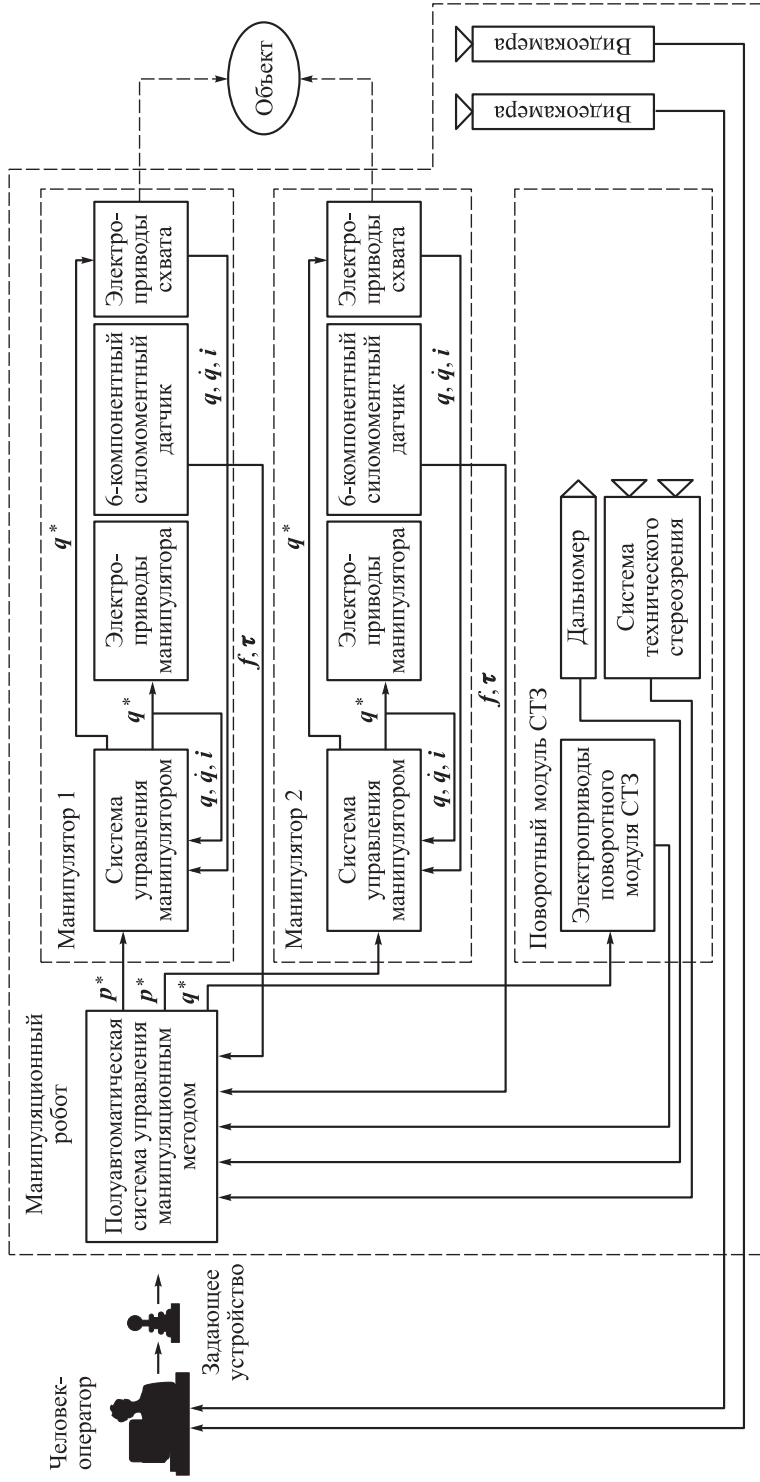


Рис. 3. Функциональная схема полуавтоматической системы управления (СТЗ – система технического зрения)

дают возможность надежно установить объект на поверхность, не уронив его и не раздавив о рабочую поверхность.

Рассмотрим более подробно алгоритмы работы полуавтоматической системы на этапе 2. В зависимости от поставленной задачи было предложено ввести новые режимы работы манипуляционной системы:

- *режим сохранения заданного усилия* – для решения задачи переноса объекта, зажатого между схватов;

- *режим управляемой податливости* как частный случай режима сохранения заданного усилия. В этом режиме заданное усилие соответствует силе тяжести, действующей на схват с зажатым объектом. Данный режим, в частности, позволяет отвинчивать резьбовое соединение, причем система управления сама определяет необходимое движение манипуляторов, чтобы исключить выход их из строя.

Переключение между режимами осуществляет человек-оператор дистанционно с помощью команд управления роботом. Контроль сил реакции может быть как в одном манипуляторе, так и в обоих манипуляторах одновременно.

Для решения поставленных задач во всех указанных режимах необходима обратная связь по усилию в системе управления робота. Это может быть обеспечено путем установки на манипуляторах датчиков сил и моментов в каждом сочленении или 6-компонентного силомоментного датчика в запястье схватов манипуляторов. Последний вариант проще в реализации и не требует решения прямой силовой задачи при управлении. Поэтому для обеспечения обратной связи по усилию на манипуляторы устанавливаются 6-компонентные силомоментные датчики. Такие датчики выдают информацию о силах и моментах реакции, непосредственно действующих на схват. Векторы сил и моментов реакции измеряются в системе координат схвата. Поскольку система управления робота дискретна, вычисление сил и моментов выполняется на каждом шаге. Обозначим $H = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_f \\ \mathbf{H}_\tau \end{pmatrix}$ – шестимерный вектор сил и моментов, измеренных силомоментным датчиком, где $\mathbf{H}_f = (f_x \quad f_y \quad f_z)^T$ – вектор измеренных сил реакции на силомоментном датчике на текущем шаге вычислений дискретной системы управления; $\mathbf{H}_\tau = (\tau_x \quad \tau_y \quad \tau_z)^T$ – вектор измеренных моментов реакции на текущем шаге вычислений.

Рассмотрим режим сохранения заданного усилия. Оператор зажимает объект с помощью фрикционных губок-схватов, установленных на схвате манипуляторов, с силой, заданной заранее (рис. 4). Основной проблемой в этом режиме является сохранение заданного усилия сжатия объекта между манипуляторами при управлении положением

где i – шаг вычисления; $\Delta \mathbf{p}_k = \mathbf{V}_k \Delta t$ – вектор перемещения выходного звена за время дискретизации Δt ; \mathbf{V}_k – линейная скорость выходного звена k -го манипулятора на данном шаге; $M(\Delta \hat{\omega}, \Delta \theta)$ – матрица поворота выходного звена k -го манипулятора на угол $\Delta \theta_k$ относительно единичного вектора $\Delta \hat{\omega}_k$, причем $\Delta \hat{\omega}_k = \frac{\Delta \boldsymbol{\omega}_k}{|\Delta \boldsymbol{\omega}_k|}$ и $\Delta \theta_k = |\Delta \boldsymbol{\omega}_k| \Delta t$.

Угловые скорости вращения объекта и схватов манипуляторов равны друг другу: $\boldsymbol{\omega}_1 = \boldsymbol{\omega}_2 = \boldsymbol{\omega}_e$.

Определим линейные скорости выходных звеньев манипуляторов:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_1^* &= \mathbf{V}_e + \mathbf{V}_\omega; \\ \mathbf{V}_2^* &= \mathbf{V}_e - \mathbf{V}_\omega + \Delta \mathbf{V}_R, \end{aligned}$$

где \mathbf{V}_1^* и \mathbf{V}_2^* – требуемая скорость 1-го и 2-го манипуляторов; \mathbf{V}_e – линейная скорость объекта, заданная оператором; \mathbf{V}_ω – дополнительная линейная скорость манипуляторов, необходимая для вращения зажатого объекта, $\mathbf{V}_\omega = \boldsymbol{\omega}_e \cdot \mathbf{r}$ (здесь $\boldsymbol{\omega}_e$ – угловая скорость вращения объекта, заданная оператором; \mathbf{r} – вектор, соединяющий центр вращения объекта и схват манипулятора); $\Delta \mathbf{V}_R$ – дополнительная линейная скорость выходного звена одного из манипуляторов, компенсирующая отклонения силы сжатия от заданных значений, представлена в виде функции от H_1 и H_2 – показаний силомоментного датчика соответственно 1-го и 2-го манипуляторов; $\Delta \mathbf{V}_R = \mathbf{f}(H_1, H_2)$.

При вычислении $\Delta \mathbf{V}_R$ необходимо контролировать оба датчика, чтобы исключить из показаний силу тяжести зажатого объекта. Поскольку схваты манипуляторов располагаются на одной оси, такое их положение автоматически обеспечивается системой управления. Для определения текущей силы сжатия достаточно рассматривать составляющую \mathbf{f}_z показаний датчиков, т. е.

$$\Delta \mathbf{V}_R = k_V k_f (\min(\mathbf{f}_{z1}, \mathbf{f}_{z2}) - \mathbf{f}_0),$$

где \mathbf{f}_{z1} и \mathbf{f}_{z2} – составляющая \mathbf{f}_z силомоментных датчиков соответственно 1-го и 2-го манипуляторов; \mathbf{f}_0 – заранее заданное оператором усилие сжатия; k_V – коэффициент приведения; k_f – коэффици-

ент усиления, определяющий скорость реакции системы управления на изменение показаний силомоментных датчиков.

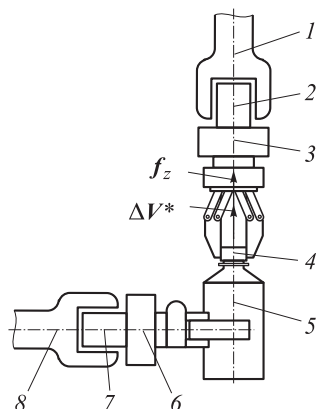


Рис. 5. Отвинчивание крышки бутылки:

1 – предпоследнее звено 2-го манипулятора; 2 – выходное звено 2-го манипулятора; 3 – силомоментный датчик; 4 – крышка; 5 – бутылка; 6 – силомоментный датчик; 7 – выходное звено 1-го манипулятора; 8 – предпоследнее звено 1-го манипулятора

С использованием режима податливости решается задача отвинчивания резьбового соединения (рис. 5). В этом режиме, так же как в режиме сохранения заданного усилия, скорость выходного звена манипулятора задается функцией, зависящей от показаний силомоментного датчика:

$$\Delta V^* = f(H - G),$$

где ΔV^* – требуемая скорость выходного звена манипулятора с крышкой; H – показания силомоментного датчика; G – показания силомоментного датчика в состоянии покоя, что соответствует силе тяжести зажатого в схвате объекта.

Поскольку базовый объект с резьбой, удерживаемый первым манипулятором, располагается вертикально, для определения силы, действующей на схват с крышкой при отвинчивании, достаточно измерить f_z – составляющую показаний датчика 2-го манипулятора. Тогда требуемую скорость можно определить следующим образом:

$$\Delta V^* = k_V k_f (f_z - f_g),$$

где f_g – показания датчика при разжатом схвате (сила тяжести пустого схвата).

Для уменьшения ошибок управления вектор силы тяжести приводится к системе координат платформы [6, 8], после чего сравнивается с вектором ускорения свободного падения g .

Таким образом, полуавтоматическая система управления осуществляет управление манипулятором по скорости, используя данные от задающего устройства пульта управления и показания сило-

моментных датчиков, что обеспечивает перенос объекта в полуавтоматическом режиме. В режиме податливости система управления задает движение, зависящее только от нагрузки, приложенной к выходному звену манипулятора. Иными словами, при отвинчивании резьбового соединения система управления сама определяет силу, действующую на хват за счет перемещения отвинчиваемой детали вдоль оси резьбы, и уменьшает данную силу путем перемещения базового объекта в направлении ее действия, чем снижает нагрузку на манипулятор.

Экспериментальное исследование. Предложенные методы были исследованы в режиме «Гиперсхват». В процессе зажатия предмета между пенами участвуют электроприводы модуля раздвоения и модулей ротации (рис. 6). Оператор на дистанционном пульте управления вызывает команду перехода в режим «Гиперсхват», после чего робот убирает манипуляторы в пены, а пены, в свою очередь, ориентируются параллельно друг другу. В этом режиме человек-оператор с помощью джойстика задает скорость перемещения средней точки между пенами, т. е. средней точки зажатого объекта.

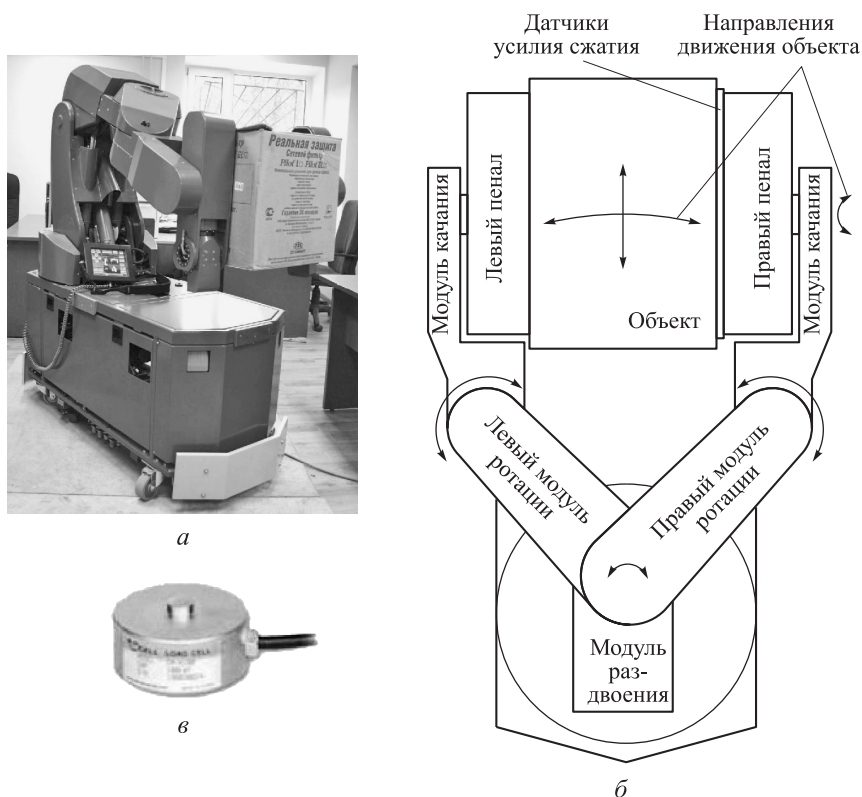


Рис. 6. Двурукый манипуляционный робот:

а – внешний вид; *б* – схема манипулятора, работающего в режиме «Гиперсхват»; *в* – датчик усилия сжатия

Робот способен перемещать зажатый предмет в цилиндрической системе координат, а также кантовать его относительно оси вращения пеналов. На рабочих поверхностях пеналов установлены прорезиненные прокладки, обеспечивающие хорошее сцепление пеналов с зажимаемым предметом, а для обеспечения автоматического зажатия на одном из пеналов установлены четыре датчика усилия сжатия СММ-50.

Сигналы от датчиков предварительно усиливаются и посылаются на сумматор (рис. 7). Результат суммирования подается на электроприводы модулей раздвоения и ротации, обеспечивающие зажатие предмета. Поскольку коэффициент упругости звеньев манипулятора достаточно высок, для обеспечения необходимой скорости реакции системы на изменения показаний датчиков частота их опроса также должна быть достаточно велика. Эта частота была выбрана опытным путем и составляет не менее 10 000 раз в секунду. Оператор заранее задает усилие сжатия предмета 10...400 Н и начинает сближение пеналов.

На каждом шаге вычислений идет опрос датчиков усилия, после чего сравниваются их показания с заданными (рис. 8). Как только показания датчиков достигают заданных значений, движение пеналов прекращается, т. е. $|f - f_0| < \varepsilon$ (f – фактическое значение усилия сжатия; f_0 – заданное значение усилия сжатия; ε – максимально допустимая ошибка установки силы сжатия). При перемещении и кантовании предмета возможно изменение фактического усилия сжатия из-за деформаций звеньев манипулятора, что особенно проявляется при усилиях сжатия, близких к максимальным. Поэтому в процессе удержания предмета данные от датчиков также контролируются и при изменении фактического усилия сжатия система управления подает сигнал на приводы модулей раздвоения и ротации, позволяющие сохранять заданные значения усилия сжатия предмета.

На испытаниях системы проводилось зажатие ящика массой 40 кг (рис. 9). Усилие сжатия 400 Н было задано оператором. Зажатый ящик робот поднял с пола и поставил на специальную платформу на высоте около 1,8 м, после чего ящик был освобожден. Проведенные испытания системы показали работоспособность метода, система управления надежно сохраняла заданное усилие сжатия во время перемещения предмета. При многократном зажатии экспериментальные данные усилия сжатия отличались от заданных не более чем на 2 %.

Предложенные способы полуавтоматического управления двуруким манипуляционным роботом, разработанным в НУЦ «Робототехника», максимально облегчают работу человека-оператора, освобождая его от непрерывного контроля за силами и моментами, развиваемыми

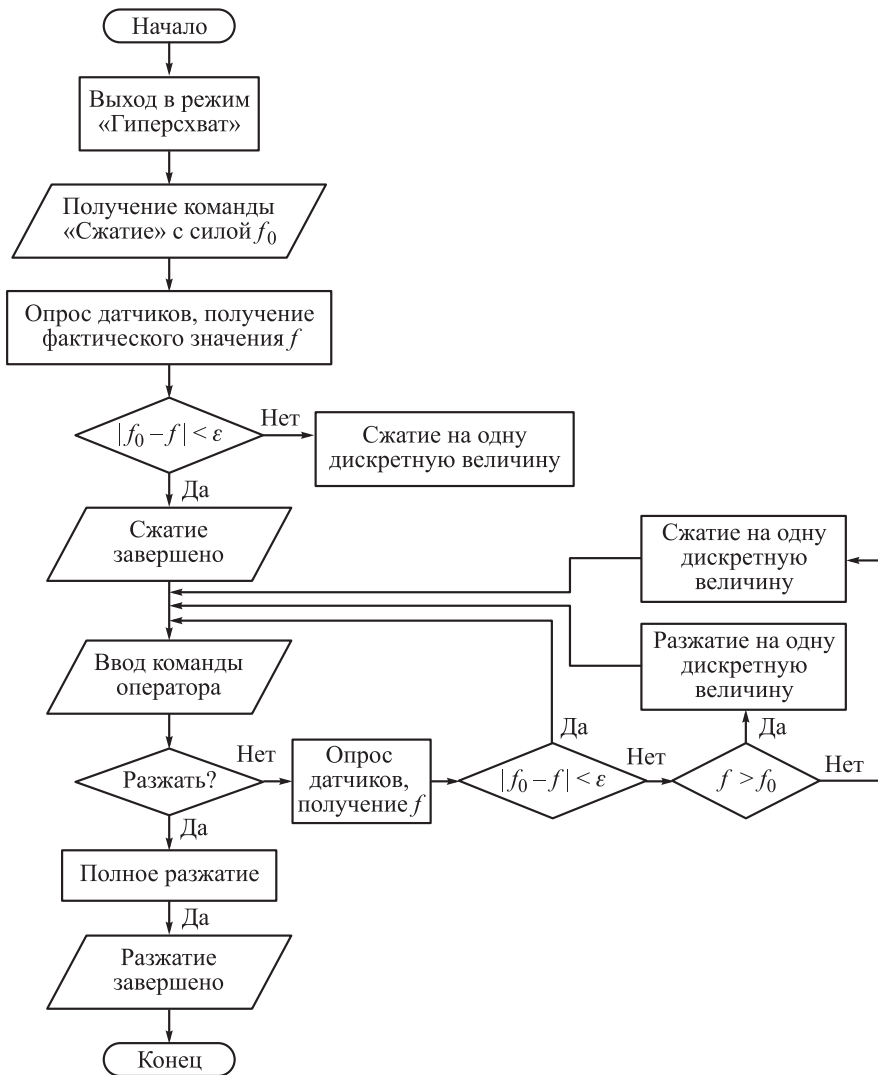


Рис. 8. Алгоритм работы системы управления сжатием в режиме «Гиперсхват»

двуруким манипулятором на объекте манипулирования. Задача контроля сил и моментов решается автоматически. Оператор задает с пульта управления только перемещение характерной точки объекта или вращение последнего. Проведенные испытания полуавтоматической системы подтвердили работоспособность предложенных способов управления. Установка силомоментного датчика в запястье схватов манипуляторов двурукого робота позволила избежать серьезных изменений в его конструкции. Разработанные методы управления допускают продолжение развития для решения более сложных манипуляционных операций, что потребует дальнейшей интеллектуализации системы управления двуруким манипулятором.



Рис. 9. Работа манипулятора в режиме «Гиперсхват»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borst C., Ott C., Wimböck Th., Brunner B. et al. A humanoid upper body system for two-handed manipulation // IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2007. – P. 2766–2767.
2. Ott Ch., Eiberger O., Friedl W. et al. A Humanoid Two-Arm System for Dexterous Manipulation // IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. – Genova, 2006. – P. 276–283.
3. Медвецкий С. В., Лихачев Н. П., Максимов А. А., Филиппов А. В. Многофункциональный транспортный робот с параллельной кинематической схемой: Сб. трудов XXI Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – СПб.: Политехника-сервис, 2010.
4. Купцов Е.А. Беспроводная рукоятка-жезл для дистанционного управления манипуляционным роботом: Сб. трудов 19-й Научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – СПб.: Политехника-сервис, 2008.
5. Купцов Е.А. Полуавтоматическая система захвата и транспортировки крупногабаритных объектов: Сб. трудов XXI Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – СПб.: Политехника-сервис, 2010.
6. Купцов Е.А., Шинюв С.Н. Решение прямой и обратной позиционных задач для двурукого манипуляционного робота: Сб. трудов Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – СПб.: Политехника-сервис, 2010.
7. Купцов Е.А. Метод дистанционного управления манипуляционным роботом с контролем скорости движения и сил реакции на выходном звене: Сб. трудов Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – СПб.: Политехника-сервис, 2011.
8. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами: учебник для вузов. 2-е изд., исправ. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

Статья поступила в редакцию 28.06.2012