

В. А. Карташев, проф. д-р физ. мат. наук, вед. науч. сотр., kart@list.ru,
А. А. Богуславский, д-р физ. мат. наук, вед. науч. сотр., anbg74@mail.ru,
В. В. Карташев, канд. физ. мат. наук, мл. науч. сотр., vsevolod.kartashev@gmail.com,
В. С. Ярошевский, канд. физ. мат. наук, вед. науч. сотр., yarosh@list.ru,
С. В. Михасеку, аспирант, savva.mikh@gmail.com,
Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН

Задачи управления манипуляционным роботом для обеспечения безопасности перемещений¹

Рассматриваются задачи управления манипулятором, обеспечивающего безопасность использования манипулятора в процессе эксплуатации за счет контроля исправности оборудования и проверки корректности задания программной траектории движения. Использование системы технического зрения позволяет обеспечить безопасность работы человека в рабочей зоне манипулятора. Предложен алгоритм, который в масштабе реального времени обнаруживает попадание постороннего предмета в заданную область рабочей зоны манипулятора.

Ключевые слова: безопасность перемещений манипулятора, система технического зрения, геометрическое представление рабочего пространства

Обеспечение безопасности перемещений манипуляционных роботов является необходимым условием расширения областей их применения и увеличения производительности за счет снижения простоев, связанных с поломкой оборудования. Этот тезис справедлив не только для тех применений, на которых манипуляторы продемонстрировали возможность эффективного применения (в частности серийное производство), но и для развивающихся направлений, например, космической робототехники и медицинских приложений.

Ошибочные перемещения при сборке, связанные с возникновением неисправности манипулятора, либо на этапе обучения и настройки роботизированного комплекса, как правило, ведут к поломке оборудования. Восстановление комплекса связано с приостановкой производства и требует трудозатрат, что удорожает эффективность обучения и снижает экономические показатели комплекса на производстве.

В медицинских манипуляционных комплексах и других комплексах, связанных со взаимодействием с человеком, ошибочные движения могут привести к непоправимым последствиям для здоровья человека.

Решение рассматриваемой задачи состоит в своевременном выявлении неисправностей манипулятора и ошибочных целевых точек и в динамической коррекции движения, которые позволяют избегать столкновений при попадании в рабочую зону посторонних предметов. Возможность решения этих задач в реальном времени обусловлена появлением высокопроизводительных управляющих контроллеров.

На рис. 1 показана система управления манипуляционным роботом. Она содержит два уровня управления: уровень управления приводами (нижний уровень управления) и уровень задания программных точек движения (верхний уровень управления). Традиционно контроллер нижнего уровня обеспечивает следящее управление движением

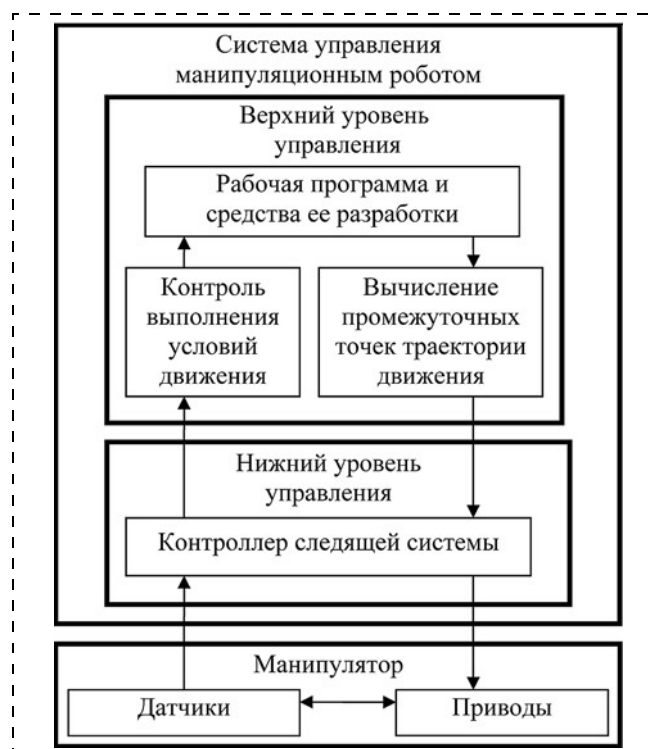


Рис. 1. Структура системы управления манипуляционным роботом

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-08-01012_А.

приводов, основываясь на показаниях датчиков положения валов приводов и заданной программной траектории. Сбои в работе датчиков, отказы приводов и электронных систем управления ими приводят к значительным отклонениям движения степеней подвижности. Таким образом, одним из путей обеспечения безопасности движения манипуляционных роботов является контроль исправности работы оборудования.

Критерием исправности датчиков положения является непрерывность изменения их показаний. Для проверки этого условия необходимо обеспечить достаточно высокую частоту опроса датчиков, что требует использования в следящей системе контроллеров, производительность которых существенно выше, чем требуется для реализации следящего управления приводами.

Критерием исправности оборудования является соответствие моментов в приводах управляющим моментам уравнений движения манипуляционной системы. Теоретические трудности в этой задаче состоят в том, что нагрузка на приводы меняется в соответствии с программой функционирования манипулятора и часто заранее неизвестна. Частичным решением этой проблемы является контроль фактического ускорения степеней подвижности.

В отсутствие внешней нагрузки изменение координаты степени подвижности при разгоне из состояния покоя происходит по нелинейному закону, который на начальном участке близок к параболе. Эта особенность может быть взята в основу контроля работоспособности приводов и электронной системы управления ими. Отсутствие или слишком медленное изменение координаты по сравнению со стандартной зависимостью позволяет констатировать неисправность привода и схемы управления им.

Предложенный вариант контроля работоспособности нижнего уровня управления может функционировать некорректно при наличии ограничений в перемещении манипулятора или при действии внешней нагрузки переменной величины. Для возможности учета этих факторов целесообразно ввести в команды движения языка управления роботом специальный параметр, который позволяет управлять реакцией системы контроля. Если параметр в команде движения не указан, то контроль осуществляется по описанному выше алгоритму. Задание параметра с отрицательным значением отменяет проверку для заданного движения.

Рассматриваемый способ контроля работоспособности манипулятора позволяет выявлять неисправность при выполнении части транспортных перемещений, которые выполняются без нагрузки, так как интенсивность разгона и торможения в них заранее известны. Важно также, что они составляют существенную долю всех перемещений, которые совершаются манипулятором, и поэтому контроль только этих движений позволяет обеспечить непрерывность процесса проверки работоспособности оборудования на нижнем уровне управления.

Рассмотрим теперь задачи обеспечения безопасности перемещений манипулятора, которые могут быть решены на верхнем уровне управления. Двухуровневая схема управления позволяет обеспечить контроль работоспособности каждого из уровней. В случае отсутствия ответа за заданный промежуток времени система управления каждого из уровней останавливает движение манипулятора.

Верхний уровень управления обеспечивает создание рабочей программы, обучение программным точкам, исполнение рабочей программы в отладочном и рабочем режимах, расчет промежуточных точек траектории. Ошибки в задании рабочего движения могут приводить к столкновению с технологической оснасткой и поломке оборудования. В большинстве случаев это происходит на этапе обучения при программировании транспортных перемещений и тонких технологических движений.

Для того чтобы обеспечить безопасность перемещений, достаточно в каждой точке траектории проверять отсутствие общих точек у геометрических моделей манипулятора и элементов рабочей среды. Такая проверка связана с большим объемом вычислений, поэтому ее имеет смысл осуществлять только в том случае, если управляющий микроконтроллер имеет достаточно высокую производительность. Возможность реализации проверки корректности транспортных перемещений для контроллера с ограниченной вычислительной производительностью напрямую зависит от сложности алгоритма контроля. Разработка упрощенного алгоритма позволяет использовать для управления более простой и, следовательно, более дешевый контроллер, что делает контроль доступным для большего числа манипуляционных роботов.

Построение такого алгоритма оказывается возможным, если дополнительно потребовать, чтобы элементы конструкции манипулятора были удалены от предметов в рабочей зоне на некоторое расстояние d . Этот параметр определяет необходимую точность описания геометрии манипулятора и рабочей среды. При достаточно большом его значении (10 см и более) звено манипулятора достаточно представить отрезком, например, осевой линией, так как расстояние от нее до любой точки поверхности окажется меньше d .

Предлагаемый подход делает возможным упрощение описания поверхностей оборудования и предметов, которые находятся в рабочей зоне, путем замены их гранями параллелепипедов. Удобство такого представления состоит в том, что обычно их ребра параллельны осям абсолютной системы координат. Расположение параллелепипедов и их ориентация в рабочем пространстве могут быть заданы при позиционном обучении манипулятора как в абсолютных осях, так и в осях рабочего органа.

Столкновение манипулятора с предметами, находящимися в рабочей зоне, исключены, если в любой момент времени расстояние между любым отрезком, который задает звено манипулятора, и любым

параллелепипедом больше d . Нетрудно проверить, что это условие эквивалентно выполнению в любой момент времени совокупности двух следующих неравенств:

1) расстояние между каждым концом отрезка оси звена и любой гранью параллелепипеда превышает d ;

2) расстояние между отрезком оси звена и любым ребром параллелепипеда больше d .

Проверку условий удобно проводить для d -параллелепипедов, каждый из которых получен из исходного параллелепипеда переносом каждой грани на расстояние d вовне. В этом случае достаточно проверить, что в любой момент времени:

1) концы отрезка оси находятся вне d -параллелепипеда;

2) отрезки осей всех звеньев и ребра любого d -параллелепипеда не пересекаются.

Принимая во внимание, что оси всех d -параллелепипедов направлены вдоль осей абсолютной системы координат, проверка первого условия сводится к проверке выполнимости неравенств $a_{in} > p_{jm}$ либо $b_{in} < p_{jm}$. Здесь a_{in} и b_{in} — координаты грани с номером i , $i = 1, \dots, 6$, параллелепипеда с номером n в проекции на соответствующую ось; p_{jm} — координата j конца отрезка, $j = 1, \dots, 3$, звена m .

Для проверки выполнимости второго условия достаточно вычислить объем фигуры, натянутой на отрезок звена $P_m Q_m$ и ребро параллелепипеда $A_{in} B_{in}$. Объем этой фигуры равен определителю матрицы, составленной из координат векторов $A_{in} B_{in}$, $A_{in} P_m$, $A_{in} Q_m$. Для того чтобы отрезок и ребро не пересекались, необходимо и достаточно, чтобы определитель не обращался в нуль.

Аналогичный способ избежать столкновения манипулятора с предметами в рабочей зоне был реализован в работе [1]. Подсистема контроля столкновений являлась частью системы графической визуализации движения многозвенного манипулятора, работавшей в масштабе реального времени под управлением ЭВМ типа РС-486 с тактовой частотой процессора 50 МГц.

Отсутствие четкой видимой границы рабочей зоны робота делает работу человека не только некомфортной, но и рискованной. Применение ограждающих конструкций для защиты рабочего пространства робота оказывается не всегда возможным. Как показывает практика использования промышленных роботов, этот прием также не позволяет полностью исключить проникновение человека в рабочую зону манипулятора. В последнее десятилетие в области компьютерного зрения сформировалось направление, связанное с решением задач обеспечения безопасного взаимодействия робота и человека [2].

Рассмотрим использование системы технического зрения для контроля попадания в рабочую зону посторонних предметов. Решение этой задачи состоит в обнаружении момента пересечения границы рабочей зоны посторонним предметом. По-

падение в область границы фиксируется по изменению изображения ее участка. Изменения можно выявить путем сравнения текущего изображения области границы с исходным, которое было запомнено в начале работы. Для того чтобы определить направление движения предмета, достаточно предварительно разбить область границы на секторы и сравнивать изменения изображения секторов.

Для выявления различий в двух изображениях часто используют метод вычитания изображений. Недостаток метода состоит в большой зависимости от смещения камеры. Даже сдвиг на один пиксел приводит к появлению на разнице изображений артефактов. Исключить этот недостаток позволяет следующий метод сравнения.

Как известно, изображение, получаемое с камеры, является множеством пикселей, каждый из которых несет информацию о положении на видеоматрице и яркости составляющих цветов в цветовой схеме RGB:

$$I = \{p(x_p, y_p, r_p, g_p, b_p)\}.$$

Здесь (x_p, y_p) — координаты пиксела p на видеоматрице, (r_p, g_p, b_p) — цвето-яркостные составляющие видеосигнала.

В предлагаемом алгоритме используются проекции изображений в пространство RGB:

$$M(I) = v(r_p, g_p, b_p).$$

Здесь M — образ проекции изображения границы I в пространстве RGB, $v(r_p, g_p, b_p)$ — точка в пространстве RGB — образ пиксела $p(x_p, y_p, r_p, g_p, b_p)$.

В начальный момент времени алгоритм запоминает образ границы $M(I_0)$. В процессе работы текущий образ сравнивается с исходным. При наличии существенных отклонений принимается решение, что в контролируемую зону попал предмет.

Необходимым условием применимости алгоритма является его возможность работать в масштабе реального времени. Для того чтобы обеспечить требуемую производительность, контролируются точки изображения, которые расположены в узлах сетки с некоторым шагом. Значение шага задается при обучении системы.

Рассмотрим работу алгоритма на примере. На рис. 2 показано исходное изображение поверхности. На рис. 3 дано изображение предмета, который обнаружен на поверхности. Точки, цвет которых существенно отличается от исходной поверхности, отмечены светлым тоном. Шаг сетки в пространственном разрешении составляет 5×5 мм. Время обработки одного кадра для процессора 1,8 ГГц занимает 6 мс.

Простейшей реакцией системы управления на появление в рабочей зоне постороннего предмета является остановка манипулятора. До полной остановки манипулятор совершает некоторое перемещение, которое в настоящее время не контролируется. В результате нельзя исключить соударения с

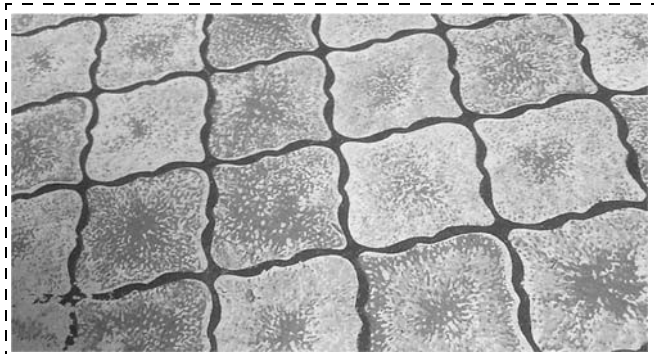


Рис. 2. Изображение фона

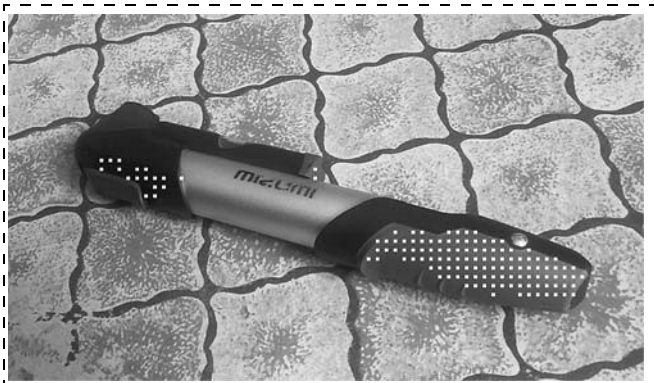


Рис. 3. Выявление предмета на фоне

объектами, которые расположены в рабочей зоне. По этой причине аварийное торможение целесообразно осуществлять по более сложной программе, которая учитывает динамику движения манипулятора, например, отключая степени подвижности поочередно.

Более сложная реакция на появление в рабочей зоне постороннего предмета может включать в себя переход в пошаговый режим исполнения движений, запрещение всех перемещений в сторону зоны границы, со стороны которой было обнаружено появление постороннего предмета, продолжение программы с уменьшенной скоростью и т. д. Выбор реакции на возникновение нештатной ситуации может осуществляться путем указания режима исполнения рабочей программы из заранее предусмотренного набора.

Реализация рассмотренных задач обеспечения безопасности перемещений манипуляционного робота связана с существенным развитием и усложнением функции системы управления. Этот вывод относится ко всем уровням управления — как к уровню следящей системы, так и к уровню построения движения. Возможность усложнения соответствующих алгоритмов управления основывается на появлении новых микроконтроллеров с повышенной производительностью. Например, управляющий модуль Arduino Maple mini оснащен ARM Cortex A5 [3] с тактовой частотой 72 МГц, что позволяет ему проводить вычисления в несколько раз быстрее, чем управляющие модули Arduino на базе

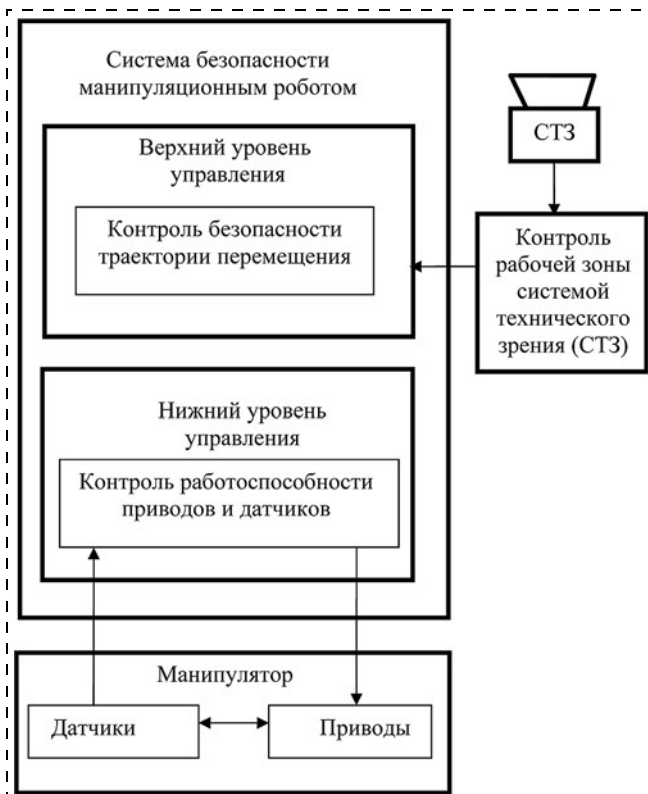


Рис. 4. Функции обеспечения безопасности работы манипуляционного робота

микропроцессоров Atmega [4], рабочая частота которых 12 МГц.

Рассмотренные алгоритмы управления позволяют расширить штатные функции системы управления контролем работоспособности манипулятора и проверкой корректности задания программного движения (рис. 4). Контроль безопасности работы человека в рабочей зоне делает целесообразным дополнение системы управления блоком обработки изображения, который контролирует рабочую зону. Эта функция обеспечивает безопасность работы человека в рабочей зоне при разработке и настройке алгоритмов управления технологическими движениями и также полезна для обеспечения безопасности функционирования манипуляционного комплекса в процессе эксплуатации. Возможность выполнения функции контроля штатными аппаратными средствами зависит от сложности алгоритма обнаружения попадания предмета в рабочую зону. Актуальным является вопрос о реализуемости контроля средствами микропроцессорной техники. Разработка такого блока делает возможным включение его в качестве штатной подсистемы системы управления манипулятором.

Список литературы

1. Карташев В. А. Управление движением манипулятора, составленного из одинаковых модулей // Известия РАН. Серия "Теория и системы управления". 2006. № 6. С. 168—174.
2. Wohler C. 3D Computer Vision. 2nd ed. Springer, 2013. P. 385.
3. Мартин Т. Микроконтроллеры фирмы STMicroelectronics на базе ядра Cortex-M3. Серия STM32. М.: Техносфера, 2009. С. 96.
4. Olsson T. Arduino Wearables. Apress, 2012. P. 336.

V. A. Kartashev, Professor, Leading researcher, kart@list.ru,
A. A. Boguslavsky, Leading researcher, anbg74@mail.ru,
V. V. Kartashev, Junior researcher, vsevolod.kartashev@gmail.com,
V. S. Yaroshevsky, Leading researcher, yarosh@list.ru,
S. V. Michaesku, Postgraduate student, sawva.mikh@gmail.com,
Keldysh Institute for Applied Mathematics

Problems of Manipulator Motions Safety

The problems of manipulator motions safety are discussed. The first one is to exclude occasional incorrect motions. The source of such motions is malfunction of robot equipment. The methods of real time robot serviceability checking are proposed. They are based on analysis of continuity and nonlinearity of position sensors changing in all motions. The second source of equipment failure is collisions with technological equipments during robot training procedure. It takes place during adjustment of program points and trajectories. Geometrical modeling of manipulator and workspace allows to avoid such mistakes. The proposed method of limited accuracy of geometry presentation reduces computation complicity of verification. Technical vision is considered as subsystem of human operator safety in manipulator workspace. Ability of operator displacement tracking depends on control unit performance. The algorithm to detect outside object penetrating into the specified zone of workspace in real time is described.

Keywords: manipulator motions safety, real time checking of robot serviceability, geometrical presentation of workspace, technical vision system

References

1. Kartashev V. A. Upravlenie dvizheniem manipulyatora, sostavlennogo iz odinakovykh moduley. *Izvestiya RAN. Seriya "Teoriya i sistemy upravleniya"*. 2006. N. 6. P. 168—174.

2. Wöhler C. 3D Computer Vision. 2nd ed. Springer, 2013. P. 385.
3. Martin T. Mikrokontrollery firmy STMicroelectronics na baze yadra Cortex-M3. Seriya STM32. M.: Tekhnosfera, 2009. P. 96.
4. Olsson T. Arduino Wearables. Apress, 2012. P. 336.

УДК 621.865.8

А. А. Богданов¹, рук. лаборатории, А. С. Горбанева¹, зам директора по научной работе,

И. М. Кутлубаев^{1, 2}, д. р. техн. наук, проф., науч. рук. проектов,

О. Р. Панфилова¹, канд. техн. наук, ст. преподаватель, ptmr74@mail.ru

¹ ОАО "НПО "Андроидная техника",

² ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Г. И. Носова"

Основы расчета нагрузок на кулисные механизмы, используемые в антропоморфных роботах¹

Предложен подход к определению векторных инерционных нагрузок, действующих на звенья кулисных механизмов с внутренним входом, применяемых в антропоморфных роботах.

Ключевые слова: кулисный механизм с внутренним входом, антропоморфный робот, силы инерции, приведенная сила

Введение

Настоятельная необходимость замены человека, выполняющего действия в неблагоприятных условиях, механическими системами определило нарастающий интерес к созданию антропоморфных роботов [1]. Этому в значительной мере способствуют достижения в смежных областях — электронике, механике, гидравлике.

Схема построения антропоморфного робота основана на обеспечении кинематики, присущей человеку [2]. Подобие кинематической схемы робота

скелету человека определяет и необходимость реализации соответствующих углов поворота, скоростей и ускорений по аналогичным степеням свободы [3]. В частности, при реализации шагающего типа движения угловые скорости звеньев превышают 3 рад/с, а угловые ускорения достигают 50 рад/с². При этом возникают значительные инерционные нагрузки, которые следует учитывать при определении приведенных усилий.

Общая методика определения приведенных моментов достаточно хорошо разработана [4]. Применительно к механизмам с незамкнутыми кинематическими схемами вопросы проработаны, в частности, К. В. Фроловым и Е. И. Воробьевым [5]. В связи с этим расчет момента, приведенного к вращающемуся ведущему звену рычажного механизма, не вызывает принципиальных трудностей.

¹ Работа выполнена в рамках исследований, проводимых по договору с Фондом перспективных исследований № 5/011/2014—2016, от "23" мая 2014 г. "Разработка технологии создания комбинированной системы управления робототехническими комплексами".