

УДК 531.8

© 2001 г. И.Р. БЕЛОУСОВ, А.А. БОГУСЛАВСКИЙ, С.Н. ЕМЕЛЬЯНОВ,
Д.Е. ОХОЦИМСКИЙ, А.К. ПЛАТОНОВ, В.В. САЗОНОВ, С.М. СОКОЛОВ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА СО СФЕРИЧЕСКИМИ МАЯТНИКАМИ

Описаны алгоритмы управления роботом-манипулятором при взаимодействии его с подвижными объектами – одним или двумя теннисными мячами, подвешенными на нитях и совершающими заранее неизвестные колебания. Контур управления роботом содержит систему технического зрения, которая выполняет функции измерительного прибора. Данные измерений, поставляемые этой системой, обрабатываются с использованием математической модели колебаний мячей, что позволяет определить их фактическое движение, сделать прогноз этого движения, спланировать и выполнить одну из следующих заранее предписанных операций: 1) ударить ракеткой в хвате робота по качающемуся мячу так, чтобы он сбил неподвижную мишень, 2) ударить ракеткой по качающемуся мячу так, чтобы он попал в другой качающийся мяч, 3) ударить ракеткой по качающемуся мячу так, чтобы он попал в другой качающийся мяч и этот второй мяч сбил неподвижную мишень. Операции перечислены в порядке возрастания сложности и выполняются с разной надежностью. Экспериментальные оценки надежности выполнения этих операций позволили судить о предельных возможностях используемой системы управления. Приведены характеристики экспериментальной установки и результаты экспериментов.

1. Управление роботом-манипулятором с использованием динамической модели объектов манипулирования. В работе описывается экспериментальная проверка идеи, что робот-манипулятор с не очень совершенной, позиционно-контурной, системой управления может успешно взаимодействовать с движущимся объектом, если в контуре управления робота использовать систему технического зрения и точный прогноз движения объекта, основанный на его динамической модели и обработке зрительной информации.

Первые результаты такой проверки приведены в [1–3]. Эксперименты проводились на специальном стенде, состоящем из робота-манипулятора РМ-01 (типа PUMA-560), системы технического зрения (СТЗ) и захватываемого объекта в виде стержня, качающегося на бифилярном подвесе. Изображение стержня в ТВ-камере преобразовывалось в цифровой код, полученная информация обрабатывалась, и в результате определялись координаты концевых точек изображения стержня на ПЗС-матрице камеры. За 1 с производилось до 25 таких обработок изображений. Полученные данные о положении стержня подвергались статистической обработке с использованием математической модели его движения. Обработка данных, накопленных за 0,3 с, позволяла определить начальные условия движения стержня и дать прогноз этого движения на несколько секунд вперед. По результатам прогноза рассчитывался момент времени, в который должен был совершаться захват стержня манипулятором. Эксперименты оказались успешными. Они продемонстрировали весьма высокую надежность захвата стержня с первой попытки и работоспособность алгоритмов анализа производимых оператором возмущений его свободных колебаний.

Новые эксперименты, первые результаты которых приведены в [2], проводились с качающимися на нитях теннисными мячами и были посвящены изучению предельных возможностей рассматриваемого подхода к управлению роботом-манипулятором РМ-01 с имеющейся системой управления. В этих экспериментах по существу та же система управления, что и описанная в [1–3], использовалась для решения более сложных по своим динамическим свойствам задач. Данная работа близка к работе [4], в которой описан робот-манипулятор, имеющий СТЗ в контуре управления и отбивающий в заданном направлении шайбу "воздушного" хоккея.

Стенд для выполнения экспериментов включал робот-манипулятор РМ-01 со стойкой управления "Сфера-36", два сферических маятника в виде теннисных мячей, подвешенных на нитях длиной 220 см, ПЭВМ Pentium 166 и ТВ-камеру. Положения покоя мячей находились в одной горизонтальной плоскости примерно в 50 см друг от друга, одно из этих положений находилось на расстоянии около 70 см от стойки манипулятора на высоте 20 см от поверхности стола, на котором он был установлен. ТВ-камера была установлена вблизи середины отрезка прямой, соединяющего точки крепления нитей мячей, на высоте 240 см над поверхностью стола. СТЗ служила для получения координат центров изображений мячей на ПЗС-матрице камеры. Собранные за 1–2 с данные обрабатывались с использованием математической модели колебаний мячей. Это позволяло определять начальные условия колебаний и давать прогноз движения мячей на несколько секунд вперед. По результатам прогноза рассчитывались параметры в алгоритмах управления манипулятором.

Как и следовало ожидать, надежность успешного выполнения какого-либо эксперимента с мячами (мячом) зависит от ее сложности. Полученные в продолжительных сериях различных экспериментов оценки надежности их успешного выполнения позволили получить представление о предельных возможностях используемой системы управления.

2. Обработка телевизионного изображения. СТЗ, используемая при определении движения мячей, состоит из ТВ-камеры, устройства оцифровки и ввода телевизионного сигнала в ПЭВМ и ПЭВМ Pentium 166. ТВ-камера отображает сцену площадью примерно 1 м^2 на ПЗС-матрицу с диагональю около 1 см. Плоскость изображения камеры горизонтальна. Камера формирует видеосигнал телевизионного стандарта – 25 кадров в секунду, каждый кадр передается в виде двух полей-полукадров, состоящих поочередно из четных или нечетных строк. СТЗ обрабатывает полукадры какой-либо одной фиксированной четности. Задача обработки состоит в определении координат геометрических центров масс образов мячей на цифровом изображении с максимально возможной частотой, которая в данном случае совпадает с частотой телевизионного стандарта.

Устройство ввода телевизионного сигнала в компьютер – фреймграббер VP-3MF – представляет собой плату, вставляемую в разъем расширения ПЭВМ. Фреймграббер VP-3MF рассчитан на работу с черно-белыми изображениями и позволяет выделять отдельные полукадры. Он обладает буферной памятью объемом 512 Кб для хранения одного оцифрованного кадра в виде линейного массива байт (строка за строкой). В описываемой СТЗ фреймграббер используется в режиме съема одного полукадра размером 350×270 пикселей. Управление фреймграббером производится процессором ПЭВМ – собственного процессора у него нет, поэтому ПЭВМ во время оцифровки телевизионного сигнала работает только с фреймграббером. Оцифровка одного полукадра занимает 20 мс, что согласуется с периодом чередования полукадров во времени.

Передача полного оцифрованного полукадра из памяти фреймграббера в ОЗУ ПЭВМ занимает 180 мс. Эта величина определяется в основном устройством фреймграббера и слабо зависит от быстродействия ПЭВМ. Чтобы в такой ситуации успевать обрабатывать все полукадры одинаковой четности в реальном времени (25 полукадров в секунду), алгоритм обработки изображения использует зрительные данные лишь из сравнительно небольшого числа специально выбираемых фрагментов изображения,

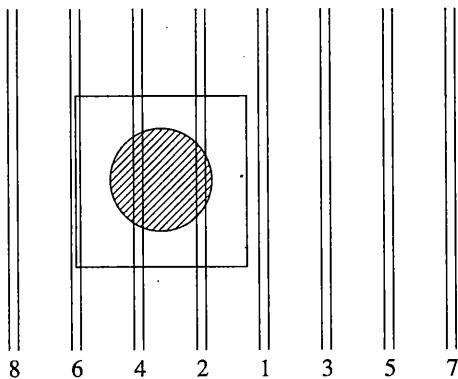
суммарная площадь которых намного меньше площади кадра. Здесь главную роль играют два свойства фреймграббера: фреймграббер позволяет копировать из его буфера в ОЗУ ПЭВМ произвольные прямоугольные участки кадра, общее время считывания фрагментов изображения из его памяти пропорционально их суммарной площади.

При поиске объектов на изображении и определении их характеристик алгоритм обработки существенно использует априорную информацию о форме объекта и его движении. Учитывается, что мячи являются контрастными объектами на специально организованном статическом фоне. Контраст между яркостями фона и объектов составляет примерно четвертую часть полного диапазона яркостей. Размеры объектов известны и фиксированы. Если положения объектов найдены в двух и более соседних кадрах, то можно сделать достаточно точный прогноз их положения в последующих кадрах.

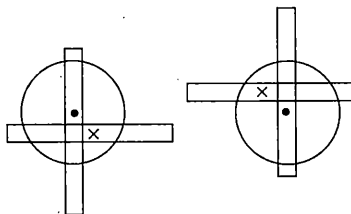
Опишем вариант алгоритма для обработки телевизионного изображения двух мячей. Алгоритм предусматривает поиск целей двумя способами – с использованием и без использования прогноза положений объектов. Обработка без использования прогноза применяется в начале процесса. Сначала из памяти фреймграббера выбирается последовательность фрагментов изображения в виде узких длинных прямоугольников размером 2×220 пикселей (фиг. 1). Фрагменты вытянуты вдоль короткой стороны поля зрения, расстояние между ближайшими фрагментами – 10 пикселей. Это расстояние выбрано с учетом диаметра изображения мяча – 20 пикселей. Фрагменты выбираются начиная от середины поля зрения по очереди с каждой ее стороны. В каждом фрагменте ищется непрерывный сегмент, соответствующий мячу по яркости. Если такой сегмент найден, то из памяти фреймграббера выбирается квадратный фрагмент изображения размером 32×32 пиксела с центром в середине сегмента. В квадратном фрагменте яркость каждого пиксела бинаризуется (приводится к одному из двух значений 0 или 1), и выполняется поиск темной связной компоненты максимальной площади. Геометрический центр масс этой компоненты принимается за центр изображения мяча.

Выборка и анализ длинных фрагментов продолжают до тех пор, пока не будут найдены оба мяча или длинными фрагментами не будет покрыта часть поля зрения размером 350×220 пикселей. Чтобы избежать последней ситуации, к экспериментатору предъявляется требование начинать эксперимент в тот момент, когда оба мяча находятся недалеко от оси объектива ТВ-камеры. Невыполнение этого требования может привести к задержке на несколько секунд начала получения измерительной информации. Напомним, что координаты центров изображений мячей (выраженные в единицах линейного размера пиксела) представляют собой конечный результат обработки отдельного кадра видеоизображения, а последовательность таких координат во времени служит исходной информацией для определения параметров движения мячей с использованием математической модели их динамики.

После того, как найдены координаты центров изображений мячей на трех близких по времени кадрах (это занимает не более 0,5 с), выполняется анализ движения этих мячей. Во-первых, координаты идентифицируются, т.е. устанавливается какая пара координат какому мячу соответствует. Во-вторых, проводится обработка полученной информации с использованием динамической модели движения мячей (см. п. 3), и определяются параметры их движения. Эти параметры используются затем для построения прогноза положений мячей в четвертом и последующих кадрах. Каждый раз после получения новой измерительной информации в результате обработки очередного кадра параметры движения переисчисляются. Тем самым надежность прогноза повышается. Если согласно прогнозу какой-либо мяч выходит за пределы поля зрения камеры, его изображение в кадре не ищется. Поиск возобновляется, когда прогноз покажет, что мяч возвратился в поле зрения. Описанная организация алгоритма требует, чтобы в начале процесса примерно в течение 0,5 с оба мяча находились в поле зрения камеры.



Фиг. 1



Фиг. 2

Поиск мячей с применением прогноза выполняется следующим образом. Программа, определяющая параметры движения целей, по запросу СТЗ рассчитывает координаты центра масс мяча в момент времени начала приема обрабатываемого кадра. Из кадра выбирается фрагмент изображения размером 32×3 пиксела с центром в точке с рассчитанными координатами (фиг. 2). В этом фрагменте выполняется бинаризация и выделяются темная связная компонента максимальной площади. Горизонтальная координата геометрического центра масс этой связной компоненты принимается за горизонтальную координату центра изображения мяча. Затем из кадра выбирается фрагмент изображения размером 3×32 пиксела с центром, совпадающим с указанным только что геометрическим центром масс. По этому фрагменту аналогичным образом определяется вертикальная координата центра изображения мяча.

Успешная реализация описанного алгоритма обработки телевизионного изображения темных мячей на белом фоне позволила снизить требования к контрасту фон/объект. В процессе обработки при пересылке зрительных данных из памяти фреймграббера в память ПЭВМ выполняется дополнительная операция вычитания изображения фона, который вводится в ПЭВМ перед началом экспериментов. Эта операция не сказывается на возможности выполнения обработки зрительных данных в режиме реального времени. Поиск мячей в одном кадре без использования прогноза их положений требует 100–150 мс, аналогичный поиск с использованием прогноза занимает примерно 12 мс.

3. Математическая модель движения подвижных объектов. Теннисный мяч, подвешенный на нити, представляет собой сферический маятник. В экспериментах максимальные отклонения каждого мяча от положения равновесия обычно не превышают 50 см при длине нити 220 см, свободные колебания мячей продолжают не более 5 с. В такой ситуации можно использовать линеаризованные уравнения движения мячей. Чтобы записать соотношения, выражающие принятую математическую модель, введем правую декартову систему координат $Oxuz$, унаследованную от экспериментов со стержнем на бифилярном подвесе [1–3]. Эта система координат удобна тем, что описанные в [3] юстировки позволяют достаточно точно установить ее связь с системами координат ТВ-камеры и манипулятора. Плоскость Oxz и ось Oz вертикальны, причем последняя близка к оптической оси камеры.

Линеаризованные уравнения движения каждого мяча можно записать в виде

$$\Delta \ddot{x} + 2\alpha \Delta \dot{x} + \frac{g}{l} \Delta x = 0, \quad \Delta \ddot{y} + 2\alpha \Delta \dot{y} + \frac{g}{l} \Delta y = 0$$

Здесь точкой обозначено дифференцирование по времени t , Δx и Δy – отклонения мяча от положения равновесия в системе координат $Oxuz$ в направлении осей Ox и Oy ,

g – ускорение свободного падения, l – длина нити, на которой подвешен мяч, α – коэффициент затухания, характеризующий трение мяча о воздух, $\alpha > 0$. Решение выписанных уравнений представим следующим образом:

$$\Delta x = e^{-\alpha t} (c_1 \cos \omega t + c_2 \sin \omega t) \quad (3.1)$$

$$\Delta y = e^{-\alpha t} (c_3 \cos \omega t + c_4 \sin \omega t)$$

где c_1, \dots, c_4 – произвольные постоянные, $\omega = \sqrt{(g/l)^2 - \alpha^2}$. Полагаем, что $\alpha < g/l$ и что параметры α и ω одинаковы для обоих мячей. Достаточная близость значений соответствующих параметров обеспечивается юстировкой. Типичные значения этих параметров $\omega \approx 2 \text{ с}^{-1}$, $\alpha \approx 0,005 \text{ с}^{-1}$.

Формулы (3.1) используются при определении движения мячей по данным измерений и для прогноза этого движения.

4. Определение движения объектов по данным измерений. Для простоты рассмотрим определение движения одного мяча. Одновременное определение движений двух мячей выполняется независимо и не приводит к усложнению алгоритма. Сначала опишем данные измерений, получаемые в результате обработки телевизионного изображения мяча.

В плоскости ПЗС-матрицы ТВ-камеры введем правую декартову систему координат $O'x'y'$. Она служит для задания положений пикселей матрицы и координат центров изображений мячей. Пикселы нумеруются парой (j_1, j_2) целых чисел, лежащих в пределах $-175 \leq j_1 \leq 174$, $-135 \leq j_2 \leq 134$. Средняя точка пиксела с номерами (j_1, j_2) имеет в системе $O'x'y'$ координаты $x' = j_1 s_p$, $y' = -j_2 s_p$, где $s_p = 0,017 \text{ мм}$. Пусть (a, b) – координаты в этой системе центра изображения мяча, находящегося в положении равновесия, (x', y') – аналогичные координаты в случае произвольного положения мяча. Соответствующие смещения Δx и Δy этого мяча относительно положения равновесия вдоль осей Ox и Oy системы $Oxyz$ определяются формулами

$$\Delta x = k[(x' - a) \cos \varphi + (y' - b) \sin \varphi] \quad (4.1)$$

$$\Delta y = k[-(x' - a) \sin \varphi + (y' - b) \cos \varphi]$$

Использованные здесь параметры k и φ находятся в процессе юстировки, описанной в [3].

Данные измерений, получаемые в результате обработки телевизионного изображения мяча, представляют собой координаты центра этого изображения, выраженные в единицах s_p , и моменты времени, к которым эти координаты относятся. Время отсчитывается таймером ПЭВМ от момента запуска программы обработки изображения. По формулам, указанным выше, данные измерений пересчитываются в переменные Δx , Δy . Полученные числа будем называть псевдоизмерениями этих переменных. Псевдоизмерения, отвечающие моменту времени t_i ($i = 1, 2, \dots; t_1 < t_2 < \dots$), обозначим Δx_i , Δy_i . Алгоритм определения движения обрабатывает информацию

$$t_i, \Delta x_i, \Delta y_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (4.2)$$

Псевдоизмерения содержат ошибки, поэтому для истинного движения мяча, описываемого некоторыми функциями $\Delta x(t)$ и $\Delta y(t)$, имеют место лишь соотношения $\Delta x(t_i) \approx \Delta x_i$, $\Delta y(t_i) \approx \Delta y_i$. Полагаем, что функции $\Delta x(t)$ и $\Delta y(t)$ задаются формулами (3.1), но значения входящих в эти формулы постоянных c_1, \dots, c_4 неизвестны. В рамках сделанного допущения определение движения мяча сводится к определению указанных постоянных из полученных псевдоизмерений. Эта задача решается методом наименьших квадратов.

Для определения c_1, \dots, c_4 решаются две однотипные задачи. Постоянные c_1 и c_2 находятся по псевдоизмерениям Δx_i . Согласно методу наименьших квадратов состав-

ляется система нормальных уравнений

$$c_1 \sum_{i=1}^N u_i^2 + c_2 \sum_{i=1}^N u_i v_i = \sum_{i=1}^N u_i \Delta x_i$$

$$c_1 \sum_{i=1}^N u_i v_i + c_2 \sum_{i=1}^N v_i^2 = \sum_{i=1}^N v_i \Delta x_i$$

$$u_i = e^{-\alpha t_i} \cos \omega t_i, \quad v_i = e^{-\alpha t_i} \sin \omega t_i$$

Ее решение дает c_1 и c_2 . Аналогичным образом по псевдоизмерениям Δu_i находятся c_3 и c_4 .

Приведем оценки точности определения движения мяча описанным способом. Эти оценки получены в результате обработки реальных зрительных данных с использованием специальных тестирующих программ. Сначала рассмотрим прогноз центра изображения мяча в алгоритме обработки видеоизображения. В этой задаче прогноз строится по небольшому числу измерений и, как правило, делается не более чем на 0,05 с вперед. Погрешность прогноза при этом не превышает 0,5 пиксела. В ситуации, когда мяч выходит за пределы поля зрения камеры, прогноз делается не более, чем на 1 с вперед. При этом уже бывает накоплено не менее 10–15 моментов времени с измерениями. В такой ситуации погрешность прогноза не превышает 1 пиксела.

Управление роботом выполняется по данным измерений, накопленным в течение 1–2 с. В этом случае в (4.2) $N = 20$ –50, и прогноз положения центра мяча на 5 с вперед выполняется с погрешностью, как правило, не превышающей 2–3 мм (менее 2 пикселов на ПЗС-матрице).

5. Управление роботом при взаимодействии с подвижными объектами. Эксперименты на описываемом стенде заключались в выполнении роботом одной из следующих заранее предписанных операций: ударить ракеткой в схватке по качающемуся мячу так, чтобы он сбил неподвижную мишень, ударить ракеткой по качающемуся мячу так, чтобы он попал в другой качающийся мяч, ударить ракеткой по качающемуся мячу так, чтобы он попал в другой качающийся мяч и этот второй мяч сбил неподвижную мишень. Управление роботом в этих операциях проводится по однотипным схемам, между которыми однако имеются некоторые отличия, обусловленные спецификой траекторий движения объектов. Рассмотрим основные соотношения, лежащие в основе алгоритмов управления.

Попадание мячом по неподвижной мишени. Траектории мяча – сферического маятника – представляют собой кривые на поверхности сферы. В экспериментах используются траектории, лежащие вблизи нижнего конца вертикального диаметра этой сферы. В такой ситуации удобно рассматривать проекции траекторий на горизонтальную плоскость, в данном случае – на плоскость Ox системы координат $Oxuz$. Ниже, говоря о мишени, положениях равновесия и траекториях мячей будем иметь в виду проекции соответствующих точек и кривых на плоскость Ox .

Траектория, описываемая формулами (3.1), в общем случае представляет собой спираль, которая навивается на точку, являющуюся положением равновесия мяча. Поскольку $\alpha \ll \omega$, шаг спирали мал, и каждый ее виток мало отличается от эллипса; при $\alpha = 0$ спираль вырождается в эллипс. С учетом сказанного ниже на фигурах траектории мячей изображаются в виде эллипсов. В некоторых случаях траектория (3.1) может представлять собой отрезок прямой. Тогда этот отрезок должен проходить через положение равновесия мяча. Эти обстоятельства учитывались при выборе позиции манипулятора для удара по мячу.

Удар наносился ракеткой в виде небольшой металлической пластинки, жестко прикрепленной к схвату. Сначала предполагалось, что манипулятор с ракеткой при ударе должен быть неподвижным и располагаться так, чтобы отскочивший от ракетки мяч двигался по прямой, проходящей через положение равновесия (фиг. 3, а). С этой целью перед ударом центр ракетки необходимо было выставить в точку, лежащую на

прямой, которая проходит через положение равновесия и мишень, нормаль к ракетке необходимо было направить определенным образом. Нужное направление нормали рассчитывалось по вектору скорости мяча в момент удара о ракетку и по известным значениям соответствующих коэффициентов восстановления и ударного трения. Последние определялись экспериментально: с помощью СТЗ проводились измерения координат мячей на траекториях с ударами о ракетку; описанным в п. 4 способом определялись параметры движения мяча до удара и после него; по этим параметрам рассчитывались искомые коэффициенты. Эксперименты проводились при различных положениях ракетки. Разброс в значениях коэффициентов восстановления и ударного трения достигал 20%, тем не менее, найденные их значения позволили решить задачу. Координаты мишени в плоскости Oxy также определялись с помощью СТЗ.

К сожалению, описанный способ попадания в мишень оказался неэффективным. Отклонение мяча после удара о ракетку во многих случаях оказывалось недостаточно большим – мяч просто не долетал до мишени, хотя направление его движения было правильным. Надежное поражение мишени описанным способом достигалось лишь в случаях, когда мишень помещалась внутрь описываемых мячом начальных витков спирали (3.1).

Способ, который позволил надежно сбивать мишень, состоит в следующем. Удар по мячу наносится в момент времени, когда мяч находится на прямой, проходящей через положение равновесия и мишень (фиг. 3, в). При ударе нормаль к плоскости ракетки направлена по этой прямой, вдоль этой же прямой происходит движение ракетки. Опишем более детально расчет времени удара. Пусть (x_c, y_c) – координаты центра мишени, (x_b, y_b) – положение равновесия мяча, c_1, \dots, c_4 – параметры движения, полученные в результате обработки данных измерений (4.2), собранных на некотором временном отрезке, на котором мяч совершает свободные колебания. Время t_s нанесения удара по мячу определяется уравнением

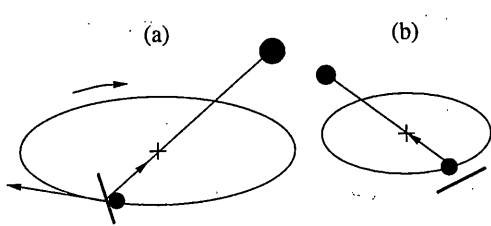
$$\frac{c_1 \cos \omega t_s + c_2 \sin \omega t_s}{c_3 \cos \omega t_s + c_4 \sin \omega t_s} = \frac{x_c - x_b}{y_c - y_b}$$

Корни этого уравнения выражаются аналитически и образуют арифметическую прогрессию с шагом π/ω . При удачном положении мишени корни разбиваются на две группы. Корням первой группы отвечают точки удара по мячу, расположенные вблизи манипулятора. В этих точках удар возможен. Корням второй группы отвечают точки удара по мячу, расположенные далеко от манипулятора, в которых манипулятор не может нанести удар из-за кинематических ограничений. Корни обеих групп перемежаются. Для нанесения удара выбирается минимальный корень первой группы, для которого манипулятор успевает выйти на ударную позицию и нанести удар.

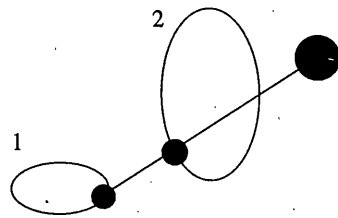
Попадание мячом по качающемуся мячу. Обозначим через $\Delta x^\circ(t)$ и $\Delta y^\circ(t)$ – функции (3.1) для мяча-биты, через $\Delta x(t)$ и $\Delta y(t)$ аналогичные функции для мяча-мишени. Пусть (x_b°, y_b°) – положение равновесия мяча-биты, (x_b, y_b) – положение равновесия мяча мишени. Время t_s нанесения манипулятором удара по мячу-бите определяется уравнением

$$\frac{\Delta x^\circ(t_s)}{\Delta y^\circ(t_s)} = \frac{x_b - x_b^\circ + \Delta x(t_s + \tau) - \Delta x^\circ(t_s)}{y_b - y_b^\circ + \Delta y(t_s + \tau) - \Delta y^\circ(t_s)} \quad (5.1)$$

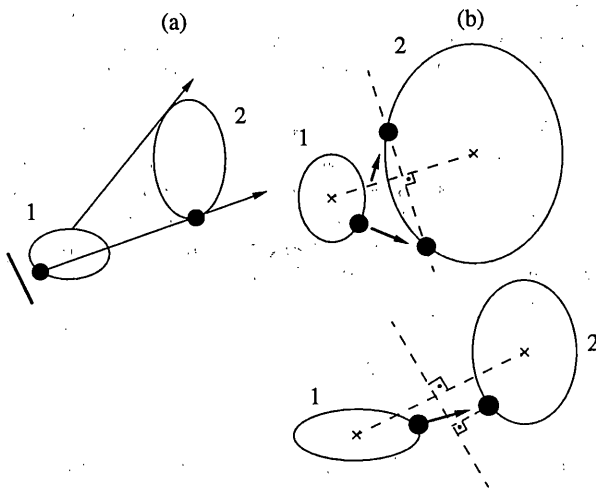
Здесь τ – положительная постоянная. При $\tau = 0$ выписанное уравнение выражает условие, что в момент удара t_s прямая "мяч-бита – мяч-мишень" касается траектории мяча-мишени (фиг. 4, а). В этом случае, если бы мяч-бита перемещался мгновенно по указанной прямой, то столкновение мячей происходило бы в точке, в которой их скорости коллинеарны. Относительная поперечная скорость мячей при столкновении равна нулю, и вероятность промаха минимальна. Постоянная $\tau \leq 0,3$ с введена для учета времени полета мяча-биты до мяча-мишени.



Фиг. 3



Фиг. 5



Фиг. 4

Корни уравнения (5.1) находились численно. Они образуют счетное множество и распадаются на две группы. Корням первой группы отвечают противоположные направления скоростей мячей в момент удара, корням второй группы – одинаковые направления этих скоростей. Корни обеих групп перемежаются. В качестве t_s выбирается минимальный корень первой группы, для которого манипулятор успевает выйти на ударную позицию и нанести удар. Сначала t_s рассчитывается при $\tau = 0$. Затем вычисляется расстояние

$$d = \sqrt{[x_b - x_b^0 + \Delta x(t_s) - \Delta x^0(t_s)]^2 + [y_b - y_b^0 + \Delta y(t_s) - \Delta y^0(t_s)]^2}$$

между мячами в момент удара. Значение τ выбирается из дискретного набора возможных значений в зависимости от расстояния d . Этот набор определяется экспериментально. После того как τ выбрано, момент удара t_s перевычисляется.

Нормаль к плоскости ракетки при ударе направлена по прямой, проходящей через точки $(x_b + \Delta x(t_s + \tau), y_b + \Delta y(t_s + \tau))$ и $(x_b^0 + \Delta x^0(t_s), y_b^0 + \Delta y^0(t_s))$. Импульс при ударе сообщается мячу вдоль этой же прямой. Чтобы корни первой группы уравнения (5.1) обеспечивали манипулятору удобные условия удара, амплитуды колебаний мяты-биты выбирались сравнительно небольшими: $|\Delta x^0(t)| < 20$ см, $|\Delta y^0(t)| < 20$ см.

Описанный способ попадания по подвижному мячу оказался весьма надежным. Однако, поскольку расстояние между положениями равновесия мячей составляет около 50 см, в некоторых случаях мячи при столкновении оказывались в разных горизонтальных плоскостях. В таких случаях мяч-бита попадал не в мяч-мишень, а в нить, на которой последний был подвешен. Чтобы столкновение мячей выглядело эф-

фектным, решено было алгоритм прицеливания усложнить. В новом алгоритме столкновение мячей происходит либо в вертикальной плоскости

$$(x_b - x_b^\circ)x + (y_b - y_b^\circ)y = \frac{x_b^2 + y_b^2 - (x_b^\circ)^2 - (y_b^\circ)^2}{2}$$

которая проходит через середину отрезка, соединяющего положения равновесия мячей, и перпендикулярна к нему (лежит на пересечении сфер, которым принадлежат центры мячей), либо в момент, когда мяч-мишень находится на минимальном расстоянии от этой плоскости (фиг. 4, в). Второй из этих вариантов реализуется в том случае, когда первый невозможен. Расчет времени удара производится с учетом конечности скорости движения мяча-биты. Применение нового алгоритма заметно повысило число эффективных столкновений мячей и практически не сказалось на надежности выполнения операции.

Сложный удар мячами по неподвижной мишени. Робот должен ударить по качающемуся мячу так, чтобы этот мяч попал в другой качающийся, и второй мяч сбил неподвижную мишень. Если бы скорость первого мяча после удара по нему ракеткой и скорость второго мяча после удара по нему первым мячом были бесконечно большими, то удар по первому мячу следовало бы наносить в тот момент, когда оба мяча и мишень находятся на одной прямой (фиг. 5). Это условие с учетом конечности скорости первого мяча можно записать в виде

$$\frac{x_b - x_c + \Delta x(t_s + \tau)}{y_b - y_c + \Delta y(t_s + \tau)} = \frac{x_b^\circ - x_c + \Delta x^\circ(t_s)}{y_b^\circ - y_c + \Delta y^\circ(t_s)} \quad (5.2)$$

Здесь $(x_b^\circ + \Delta x^\circ, y_b^\circ + \Delta y^\circ)$ – координаты первого мяча, $(x_b + \Delta x, y_b + \Delta y)$ – координаты второго мяча, остальные обозначения сохраняют прежний смысл. При ударе ракетка движется вдоль прямой, проходящей через точки (x_c, y_c) и $(x_b^\circ + \Delta x^\circ(t_s), y_b^\circ + \Delta y^\circ(t_s))$, нормаль к ракетке направлена по этой прямой.

Уравнение (5.2) решается численно. При $\tau = 0$ ищутся его последовательные корни на полуоси $t > 0$, и выбирается минимальный из них, для которого удар по первому мячу возможен по кинематическим условиям, а второй мяч в момент удара находится в полупространстве $(x_b - x_b^\circ)(x_b - x) + (y_b - y_b^\circ)(y_b - y) > 0$, т.е. достаточно близко от первого мяча. Для выбранного корня временная задержка τ находится так же, как и при решении уравнения (5.1).

Реализация описанного алгоритма показала, что он не очень надежен. Мишень с его помощью удается сбить примерно в 50% случаев, хотя первый мяч всегда попадает по второму. Как оказалось, успех существенно зависит от угловой скорости вращения второго мяча вокруг нити в момент удара по нему. Если эта угловая скорость не будет мала по абсолютной величине, то поражения мишени вообще не произойдет. Указанные выше 50% успешных попаданий были достигнуты лишь после принятия специальных мер по уменьшению угловой скорости второго мяча. Полностью устранить его вращение не удалось. Надежность успешного выполнения данного эксперимента можно было бы повысить, увеличив скорость удара ракеткой по первому мячу. Однако используемое значение скорости весьма близко к предельному. Имеем ситуацию, в которой надежность выполнения эксперимента лимитируется возможностями системы управления робота.

6. Выполнение удара по мячу. *Расчет положения мяча-биты в системе координат робота.* При управлении манипулятором используется жестко связанная с его основанием система координат O_1XYZ . Введем обозначения: $\|a_{ij}\|_{i,j=1}^3$ – матрица перехода от введенной в п. 3 системы $Oxuz$ к системе O_1XYZ ; (X, Y, Z) и $(X^\circ, Y^\circ, Z^\circ)$ – координаты мяча-биты и положение равновесия этого мяча в системе O_1XYZ . Справедливы

$$X = X^\circ + a_{11}\Delta x + a_{12}\Delta y + a_{13}z$$

$$Y = Y^\circ + a_{21}\Delta x + a_{22}\Delta y + a_{23}z$$

$$Z = Z^\circ + a_{31}\Delta x + a_{32}\Delta y + a_{33}z$$

$$z = \sqrt{l^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2}$$

Матрица перехода находится в результате юстировки, описанной в [3]. Координаты положения равновесия мяча находятся посредством подведения схвата манипулятора к этому положению (ср. [3]). Величины Δx , Δy вычисляются по формулам (3.1).

Расчет конфигурации робота при ударе. Способы прицеливания, описанные в п. 5, задают только вертикальную плоскость, в которой должно происходить движение мяча после удара его ракеткой и которой, следовательно, должна принадлежать нормаль к ракетке, но не определяют направление нормали полностью. Эту неопределенность следует устранить. Следует также потребовать, чтобы мяч при отскоке от ракетки не ослабил и не оборвал нить. Перечисленным требованиям можно удовлетворить, выбирая нормаль в касательной плоскости к сфере, по которой движется мяч, в точке удара.

Пусть (n_x, n_y, n_z) — единичная нормаль к ракетке в системе $Oxuz$. Алгоритм прицеливания задает отношение $n_x : n_y$. Знаки величин n_x и n_y определяются направлением удара. Условие касания выражается соотношением

$$n_x \Delta x + n_y \Delta y + n_z \sqrt{l^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2} = 0$$

где Δx и Δy задают положение мяча в момент удара. Сформулированные условия задают направление нормали к ракетке единственным образом.

Если в системе $Oxuz$ заданы компоненты нормали к ракетке и координаты точки ракетки, в которой должно произойти соударение с мячом, то эти 6 величин можно пересчитать в систему O_1XYZ и по ним однозначно определить требуемую конфигурацию манипулятора. Напомним, что последний имеет 6 степеней свободы.

Управление роботом при выполнении удара. По информации о движении мяча (мячей) рассчитываются требуемые точка удара и направление отскока мяча после него. В результате находится прямая, по которой должна двигаться ракетка при ударе и параллельно которой должна располагаться нормаль к ее плоскости. На этой прямой задаются две точки P_0 и P_1 ; P_0 — точка начала движения ракетки, P_1 — точка ее останова. Длина отрезка P_0P_1 составляет 40 см. Удар по мячу наносится в его середине. После расчета параметров удара ракетка выводится в точку P_0 с нужной ориентацией, робот выжидает некоторое время, затем ракетка движется в точку P_1 и там останавливается. Самая трудная часть рассматриваемой задачи состоит в расчете момента начала движения ракетки.

Пусть t_s — рассчитанное время удара, t_r — определяемое по таймеру ПЭВМ текущее время. По найденным точкам P_0 и P_1 определяется время τ_1 , необходимое роботу для выхода сначала в точку P_0 , а затем в точку P_1 . Если $t_s - t_r > \tau_1$, то робот успеет выполнить необходимые перемещения. Затем определяется время $\tau_2 = t_s - t_r - \tau_1$ ожидания в начальной позиции перед выходом в точку P_0 . После окончания этого ожидания роботу выдается команда выйти в точку P_0 . Перед нанесением удара, т.е. перед выдачей команды на выход в точку P_1 , выполняется задержка на время $t_s - t_r - \tau_3$, где τ_3 — половина длительности перехода робота из точки P_0 в точку P_1 . Этим достигается точное согласование движения робота со временем удара.

Оценим время, необходимое для формирования роботом нужной траектории мяча-биты. Пусть для определения параметров движения мячей и выдачи достоверного

прогноза требуется 2 с. Минимальное время на выход робота в новую точку с учетом задержек в канале связи – 0,74 с [3]. Для выхода в точку P_1 требуется минимум $(0,47/2 + 0,27)$ с. Таким образом, суммарное время на все операции составляет $2 + 0,74 + 0,51 = 3,25$ с.

7. Юстировка стенда. Для настройки описываемого стенда дополнительно к юстировкам [3] выполняются две одинаковые юстировки, которые состоят в определении параметров a, b, α и ω в соотношениях (3.1), (4.1) для каждого мяча. Каждая юстировка сводится к обработке данных измерений, полученных во время свободных колебаний мяча на интервале времени длиной 20–30 с. Пусть t_i, x'_i, y'_i ($i = 1, 2, \dots, N$) – полученные данные измерений. Величины x'_i, y'_i выражены в миллиметрах. В соответствии с формулами пп. 3 и 4 эти измерения должны аппроксимироваться функциями

$$x' = a + e^{-\alpha t} (d_1 \cos \omega t + d_2 \sin \omega t)$$

$$y' = b + e^{-\alpha t} (d_3 \cos \omega t + d_4 \sin \omega t)$$

где a, b, d_1, \dots, d_4 – постоянные величины. Значения этих величин, а также значения параметров α и ω находятся методом наименьших квадратов, причем данные измерений обеих координат обрабатываются совместно. Интерес представляют только значения a, b, α и ω .

Если значения ω для разных мячей оказывались разными, то производилось изменение длины нити одного из мячей так, чтобы отличие в значениях этого параметра имело место лишь начиная с четвертой значащей цифры. При этом в значениях α совпадали, как правило только первые значащие цифры. Значение этого параметра принималось равным среднему арифметическому значений α для обоих мячей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 99-01-00981, 96-15-96022).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Okhotsimsky D.E., Platonov A.P., Belousov I.R., Boguslavsky A.A., Borovin G.K., Emel'yanov S.N., Komarov M.M., Sazonov V.V., Sokolov S.M.* Vision system for automatic capturing a moving object by the robot manipulator // Proc. IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems IROS'97. Grenoble, France, 1997. P. 1073–1079.
2. *Okhotsimsky D.E., Platonov A.P., Belousov I.R., Boguslavsky A.A., Emel'yanov S.N., Sazonov V.V., Sokolov S.M.* Real time hand-eye system: Interaction with moving objects // Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation ICRA 98, Leuven, Belgium, 1998. P. 1683–1688.
3. *Белоусов И.П., Богуславский А.А., Емельянов С.Н., Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Сазонов В.В., Соколов С.М.* Захват подвижного объекта роботом-манипулятором. Изв. РАН. МТТ. 1998. № 4. С. 102–116.
4. *Bishop B., Spong M.* Vision-based objective selection for robust ballistic manipulation // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation ICRA 98, Workshop WS-2 'Robust vision for vision-based control of motion', Leuven, Belgium, 1998.

Москва

Поступила в редакцию
3.09.1999