

УДК 531.8

© 1998 г. И.Р. БЕЛОУСОВ, А.А. БОГУСЛАВСКИЙ, С.Н. ЕМЕЛЬЯНОВ,  
Д.Е. ОХОЦИМСКИЙ, А.К. ПЛАТОНОВ, В.В. САЗОНОВ, С.М. СОКОЛОВ

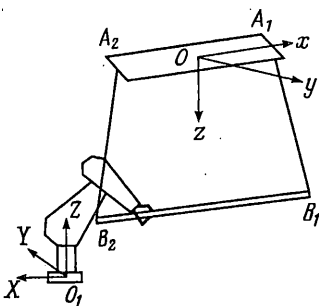
### ЗАХВАТ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ

Описаны алгоритмы управления роботом-манипулятором при захвате им подвижного объекта – стержня на бифилярном подвесе, совершающего 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 стержня, что позволяет определить его фактическое движение, сделать прогноз этого движения, спланировать и выполнить захват. Приведены характеристики экспериментального стенда и результаты экспериментов.

**1. Управление роботом-манипулятором с использованием динамической модели объекта манипулирования.** Данная работа посвящена экспериментальной проверке идеи, что робот-манипулятор с не очень совершенной системой управления может автоматически захватить движущийся объект, если в контуре управления робота использовать систему технического зрения с алгоритмами обработки зрительной информации, основанными на динамической модели объекта. Эта идея может найти применение при разработке систем управления космическими манипуляторами, установленными на подвижных платформах [1–3].

Эксперименты проводились на специальном стенде, состоящем из робота-манипулятора РМ-01, снабженного системой технического зрения (СТЗ), и захватываемого объекта в виде стержня, качающегося на бифилярном подвесе (фиг. 1). Верхние концы нитей подвеса прикреплены к неподвижной балке, на которой находится телекамера, снимающая колебания стержня и соединенная с ПЭВМ. Последняя в свою очередь связана с системой управления манипулятора – стойкой "Сфера-36".

Изображение в камере проецируется на ПЗС-матрицу и преобразуется в цифровой код. Полученная информация обрабатывается, и в результате определяются координаты концевых точек изображения стержня на ПЗС-матрице. Разработанные алгоритмы обработки телеизображения позволяют за 1 с производить до 25 таких обработок изображений. Полученные данные о положении стержня подвергаются статистической обработке с использованием математической модели его движения. Обработка данных, накопленных за 0,3 с, позволяет определить начальные условия движения стержня и дать прогноз этого движения на несколько секунд вперед. По результатам прогноза определяется момент времени, в который удобно совершить захват стержня манипулятором, и вычисляется положение манипулятора в момент захвата. С использованием модели задержек



Фиг. 1

времени в системе управления манипулятора формируются команды, инициирующие захват стержня, и выполняется захват.

Программное обеспечение позволяет в процессе эксперимента анализировать следующие ситуации: определять начало свободного движения стержня – в начале эксперимента стержень удерживается в неподвижном положении рукой экспериментатора, определять нарушение свободных колебаний стержня, устанавливать факт захвата стержня манипулятором. Время захвата зависит от начального положения стержня. Для некоторых начальных положений захват выполняется на первом полупериоде свободных колебаний стержня примерно за 1,5 с. Предусмотрен режим автоматического формирования манипулятором движения стержня путем его толчка или отпущения из некоторой начальной позиции.

Ниже описываются алгоритмы, лежащие в основе программного обеспечения стенда. Первый вариант некоторых из этих алгоритмов рассмотрен в [4, 5].

**2. Обработка телевизионного изображения.** СТЗ, используемая при определении движения стержня, состоит из черно-белой телевизионной камеры, устройства оцифровки и ввода телевизионного сигнала в ПЭВМ и ПЭВМ с процессором Pentium 166. Объектив камеры отображает сцену площадью  $1 \text{ м}^2$  на ПЗС-матрицу (преобразователь свет – сигнал) 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 либо из четных, либо из нечетных строк. СТЗ обрабатывает полукадры какой-либо одной фиксированной четности. Задача обработки состоит в определении координат концевых точек образа стержня 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  $350 \times 270$  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 совпадает 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 информацию лишь о сравнительно небольшом числе специально выбираемых фрагментов изображения, суммарная площадь которых намного меньше площади кадра. Здесь главную роль играют два свойства фреймграббера: 1) фреймграббер позволяет копировать из его буфера в ОЗУ ПЭВМ произвольные прямоугольные участки кадра, 2) общее время считывания фрагментов изображения из его памяти пропорционально их суммарной площади. Кроме того, алгоритм существенно использует априорную информацию о виде изображения объекта и о движении этого изображения. В типичной ситуации алгоритм тратит на обработку одного полукадра около 12 мс и успевает определить координаты концов стержня в данном полукадре во время, отведенное в телевизионном сигнале для полукадра другой четности. До получения и оцифровки следующего полукадра нужной четности еще остается время для расчетов, связанных с определением движения стержня.

Опишем подробнее ту часть алгоритма, которая выполняет определение коор-

динат концов изображения стержня – целочисленных индексов соответствующих пикселей в оцифрованном изображении. Основное характерное свойство образа стержня на этом изображении, позволяющее упростить выделение его концов, состоит в том, что стержень – темный, а фон, на котором он перемещается, – светлый. Контраст между яркостями фона и стержня составляет примерно четвертую часть полного диапазона яркостей. Известна также ширина изображения стержня. Именно эти обстоятельства позволяют уменьшить объем используемых в алгоритме данных.

При отсутствии прогноза координат концов стержня в анализируемом кадре работа алгоритма начинается с построения сечений кадра узкими, шириной 2 пикселя, прямоугольниками. В этих сечениях ищутся два перепада яркости, точки которых задают отрезок, представляющий собой поперечное сечение изображения стержня вертикальной или горизонтальной прямой (горизонтальным считается направление строк кадра). Если такой отрезок найден, то сечение считается удачным. Сначала производится вертикальное сечение кадра, проходящее через его центр. Если оно удачно, то производятся вертикальные сечения кадра по обе стороны от центра. Первоначальный шаг между сечениями, идущими в одну сторону, – 64 пикселя; в случае неудачи шаг уменьшается вдвое. Тем самым на каждой из сторон кадра реализуется процесс дихотомии. При уменьшении до 16 пикселей расстояния между сечением, содержащим отрезок с изображением стержня, и сечением без такого отрезка процесс дихотомии на данной стороне кадра заканчивается. После окончания этих процессов на обеих сторонах проводится анализ квадратных областей кадра размером  $16 \times 16$  пикселей, которые заведомо содержат концы изображения стержня.

Вертикальные стороны каждого такого квадрата расположены на соседних удачном и неудачном сечениях, его смещение вдоль этих сечений определяется положением прямой, соединяющей середины отрезков изображения стержня в крайних удачных сечениях кадра. Поиск концевых точек внутри квадратов производится вдоль указанной прямой. Стержень прослеживается в каждую сторону этой прямой до тех пор, пока не обнаруживается контрастный перепад яркости. Координаты точки перепада берутся в качестве координат концевой точки.

Если успешно обработаны два последовательных полукадра, то с использованием формул кинематики плоского движения твердого тела делается линейный по времени прогноз концевых точек изображения стержня в следующем полукадре. Обработка этого полукадра сводится к анализу квадратных областей размером  $16 \times 16$  пикселей с центрами в прогнозируемых точках. Если таким способом концы изображения стержня не найдены, то осуществляется переход к описанному выше детальному поиску.

Выше описаны только операции, наиболее часто используемые при обработке зрительной информации. В сравнительно редких случаях анализ этой информации выполняется несколько иначе. Например, если угол наклона стержня к горизонтали больше  $70^\circ$  или первое вертикальное сечение оказалось неудачным, то выполняется аналогичный поиск концов изображения стержня с помощью горизонтальных сечений. Если первое вертикальное и первое горизонтальное сечения оказались неудачными, то выполняются два вертикальных сечения на расстояниях четверти кадра от его вертикальных краев. Используется также ряд других приемов обработки особых случаев. Например, предусмотрено определение координат концов изображения стержня в ситуациях, когда часть стержня находится за пределами поля зрения или в начале эксперимента закрыта рукой экспериментатора.

**3. Математическая модель движения стержня.** При выводе уравнений движения стержня, качающегося на бифилярном подвесе (фиг. 1), сделаем следующие упрощающие предположения. Стержень – абсолютно жесткий и представляет собой отрезок однородной материальной прямой, нити подвеса нерастяжимы, невесомы и имеют одинаковую длину, точки крепления нитей к неподвижной балке лежат в одной горизонтальной плоскости. Из активных сил, приложенных к стержню, будем учи-

тывать силы тяжести и линейного вязкого трения о воздух. При сделанных предположениях рассматриваемая механическая система имеет три степени свободы. Общее решение уравнений движения этой системы нельзя получить в удобной аналитической форме. Поэтому в основу математической модели движения стержня положены упрощенные, частично линеаризованные уравнения, решение которых имеет простой аналитический вид и приемлемо по точности для обработки данных измерений и выполнения прогноза.

Чтобы записать соотношения, выражающие используемую математическую модель, введем правую декартову систему координат  $Oxyz$ . Точка  $O$  – середина отрезка прямой, соединяющего точки  $A_1$  и  $A_2$  крепления нитей к неподвижной балке (фиг. 1), ось  $Ox$  направлена вдоль вектора  $\overline{A_2A_1}$ , ось  $Oz$  направлена вертикально вниз. Ниже координаты точек и компоненты векторов указываются в системе  $Oxyz$ . По определению этой системы  $A_1 = (a, 0, 0)$ ,  $A_2 = (-a, 0, 0)$ , и в положении покоя стержня координаты его концов – точек  $B_1$  и  $B_2$  (фиг. 1) – имеют вид  $B_1 = (b, 0, h)$ ,  $B_2 = (-b, 0, h)$ , где  $a$ ,  $b$  и  $h$  – положительные постоянные. Числовые значения этих постоянных:  $a = 0,28$  м,  $b = 0,34$  м и  $h = 2,20$  м.

Координаты точек  $B_1$  и  $B_2$  в произвольном положении стержня представим в виде  $B_1 = (b + \xi_1, \eta_1, h + \zeta_1)$ ,  $B_2 = (-b + \xi_2, \eta_2, h + \zeta_2)$ . Величины  $\xi_i, \eta_i, \zeta_i$  ( $i = 1, 2$ ) не являются независимыми переменными. На них наложены три связи, выражающие неизменность длин отрезков  $A_1B_1, A_2B_2$  и  $B_1B_2$ . В качестве обобщенных координат системы возьмем переменные

$$\lambda = \frac{\xi_1 + \xi_2}{2}, \quad \mu = \frac{\eta_1 + \eta_2}{2}, \quad \psi = \arcsin \frac{\eta_1 - \eta_2}{2b}$$

Они имеют простой геометрический смысл:  $\lambda$  и  $\mu$  – координаты  $x$  и  $y$  средней точки отрезка  $B_1B_2$ ;  $\psi$  – угол между этим отрезком и плоскостью  $Oxz$ . Величины  $\xi_i, \eta_i, \zeta_i$  ( $i = 1, 2$ ) не удалось выразить через обобщенные координаты в аналитической форме. При заданных значениях  $\lambda, \mu$  и  $\psi$  эти величины находились численно.

Уравнения движения стержня запишем в виде уравнения Лагранжа второго рода. Силы трения стержня о воздух зададим диссипативной функцией Релея, представляющей собой сумму квадратов (с коэффициентами) обобщенных скоростей. Уравнения Лагранжа имеют устойчивое стационарное решение  $\lambda = \mu = 0, \psi = 0$ , описывающее покой стержня. Кроме того, вследствие симметрии системы, специального выбора обобщенных координат и диссипативной функции эти уравнения допускают три семейства частных нестационарных решений, описывающих движение стержня только по одной из его степеней свободы. В этих семействах либо  $\mu \equiv 0, \psi \equiv 0$ , либо  $\lambda \equiv 0, \psi \equiv 0$ , либо  $\lambda \equiv \mu \equiv 0$ . В первом из этих семейств стержень не выходит из плоскости  $Oxz$ , во втором семействе он качается в направлении оси  $Oy$  подобно качелям, в третьем совершает колебания вокруг  $Oz$ , причем его середина остается на этой оси. Уравнения, описывающие движения указанных частных типов, имеют вид

$$\lambda'' + 2\alpha_1\lambda + \Omega_1^2\lambda = 0, \quad \mu'' + 2\alpha_2\mu + \Omega_2^2\mu = 0$$

$$\psi'' + 2\alpha_3\psi + \frac{\Omega_3^2 \sin \psi}{\sqrt{1 - (4ab/h^2) \sin^2(\psi/2)}} = 0$$

причем для первого и второго семейств они линеаризованы по  $\lambda$  и  $\mu$ . Здесь  $\alpha_1, \alpha_2$  и  $\alpha_3$  – коэффициенты затухания

$$\Omega_1^2 = \frac{6g[a(b-a)^2 + bh^2]}{bh[(b-a)^2 + 6h^2]}, \quad \Omega_2^2 = \frac{g}{h}, \quad \Omega_3^2 = \frac{3ag}{bh}$$

квадраты частот,  $g$  – ускорение свободного падения, точка означает дифференци-

рование по времени  $t$ . Из вида выписанных уравнений следует, что обобщенные координаты  $\lambda$ ,  $\mu$  и  $\psi$  являются нормальными координатами полной линеаризованной системы. Соответствующие моды колебаний этой системы суть первые приближения указанных выше семейств частных решений.

Выписанные уравнения достаточно просты и обеспечивают приемлемую точность описания движения стержня. Конфигурация стэнда такова, что по модам  $\lambda$  и  $\mu$  нельзя возбуждать колебаний большой амплитуды во избежание удара стержня о манипулятор. Амплитуда же колебаний по моде  $\psi$  может быть произвольной, и при больших углах поворота стержня относительно оси  $Oz$  становится заметной зависимость частоты этой моды от амплитуды. Указанные обстоятельства позволили использовать линеаризованные уравнения для первых двух мод, но потребовали учесть нелинейные члены в уравнении для третьей моды.

Решения первых двух уравнений движения стержня задаются формулами

$$\lambda = e^{-\alpha_1 t} (c_1 \cos \omega_1 t + c_2 \sin \omega_1 t) \quad (3.1)$$

$$\mu = e^{-\alpha_2 t} (c_3 \cos \omega_2 t + c_4 \sin \omega_2 t)$$

Здесь  $c_1, \dots, c_4$  – постоянные интегрирования,  $\omega_i = \sqrt{\Omega_i^2 - \alpha_i^2}$  и предполагается, что  $0 \leq \alpha_i \leq \Omega_i$  ( $i = 1, 2$ ).

Последнее уравнение проинтегрируем приближенно и представим его решение в виде

$$\psi = e^{-\alpha_3 t} (c_5 \cos \omega_3 t + c_6 \sin \omega_3 t) + e^{-3\alpha_3 t} (C_5 \cos 3\omega_3 t + C_6 \sin 3\omega_3 t) \quad (3.2)$$

$$C_5 = \frac{1}{32} \gamma c_5 (3c_6^2 - c_5^2), \quad C_6 = \frac{1}{32} \gamma c_6 (3c_5^2 - c_6^2)$$

$$\omega_3' = \frac{\omega_3}{1 - \frac{3}{8} \gamma (c_5^2 + c_6^2)}, \quad \gamma = \frac{1}{6} - \frac{ab}{2h^2}$$

где  $c_5, c_6$  – произвольные постоянные и  $\omega_3 = \Omega_3$ . Новое обозначение для частоты введено для удобства последующих ссылок на выписанное решение.

Формулы (3.1) и (3.2) используются в алгоритмах определения движения стержня по данным измерений и прогноза этого движения. Значения параметров модели  $\omega_i$  и  $\alpha_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) определяются экспериментально из обработки данных измерений свободных колебаний стержня (см. п. 7). Параметр  $\gamma$  рассчитывается по значениям параметров  $a, b$  и  $h$ .

Следует отметить, что в математической модели движения стержня используются соотношения разных уровней точности: для описания зависимости от времени переменных  $\lambda$  и  $\mu$  используются решения линеаризованных уравнений, для описания зависимости от времени угла  $\psi$  используется приближенное решение нелинейного уравнения, в котором, к тому же, опущены члены, содержащие  $\lambda$  и  $\mu$ , а координаты точек  $B_1$  и  $B_2$  по значениям всех этих переменных вычисляются с помощью точных соотношений, выражающих неизменность длин отрезков  $A_1 B_1, A_2 B_2$  и  $B_1 B_2$ . Линеаризация этих соотношений неприемлема, поскольку амплитуды колебаний величин  $\lambda, \mu$  и  $b \sin \psi$  могут достигать до 40–60 см, а погрешность прогноза координат точек  $B_1$  и  $B_2$  должна быть не более 3–4 мм. В такой ситуации отбрасывать нелинейные члены в указанных соотношениях оказалось недопустимо.

**4. Определение движения стержня по данным измерений.** Сначала опишем данные измерений, получаемые в результате обработки телевизионного изображения стержня. В плоскости ПЗС-матрицы телекамеры введем две правые декартовы системы координат  $O'x'u'$  и  $C\xi'\eta'$ . Первая система служит для задания положения пикселей матрицы. Пикселы нумеруются парой целочисленных индексов  $(i, j)$ ,  $-175 \leq$

$\leq i \leq 174, -135 \leq j \leq 134$ . Средняя точка пиксела  $(i, j)$  имеет в системе  $O'x'y'$  координаты  $x' = is_p, y' = -js_p$ , где  $s_p = 0,0194$  мм.

Система  $C\xi\eta'$  связана с изображением покоящегося стержня. Будем считать, что изображение стержня, проецирующееся на матрицу, представляет собой отрезок с концевыми точками  $B'_1$  и  $B'_2$ , являющимися изображениями точек  $B_1$  и  $B_2$  соответственно (см. выше). Точку  $C$  и ось  $C\xi'$  выберем так, чтобы в системе  $C\xi\eta'$  в положении покоя стержня выполнялись соотношения  $B'_1 = (b', 0), B'_2 = (-b', 0)$ , где  $b' > 0$ . При используемой установке камеры ось  $C\xi'$  направлена почти параллельно оси  $Ox$  системы  $Oxyz$ . Ось  $C\eta'$  направим в ту же сторону, что и ось  $Oy$ .

Формулы перехода от системы  $C\xi\eta'$  к системе  $O'x'y'$  представим в виде

$$x' = x'_C + \xi' \cos \varphi - \eta' \sin \varphi, \quad y' = y'_C + \xi' \sin \varphi + \eta' \cos \varphi \quad (4.1)$$

Значения постоянных  $b', x'_C, y'_C$  и  $\varphi$  считаем известными. Они определяются в процессе юстировки.

Координаты точек  $B'_1$  и  $B'_2$  в системе  $C\xi\eta'$  для произвольного положения стержня представим в виде  $B'_1 = (b' + \xi'_1, \eta'_1), B'_2 = (-b' + \xi'_2, \eta'_2)$ . Поскольку оптическая ось объектива камеры практически совпадает с осью  $Oz$ , можно считать, что

$$\xi'_i = \frac{\xi_i}{k}, \quad \eta'_i = \frac{\eta_i}{k} \quad (i=1,2), \quad k = \frac{b}{b'} \quad (4.2)$$

Координаты точек  $B'_1$  и  $B'_2$  в системе  $O'x'y'$  обозначим соответственно  $(x'_1, y'_1)$  и  $(x'_2, y'_2)$ . Из формул (4.1), (4.2) и определения переменных  $\lambda, \mu$  и  $\psi$  следуют соотношения

$$\lambda = k \left[ \left( \frac{x'_1 + x'_2}{2} - x'_C \right) \cos \varphi + \left( \frac{y'_1 + y'_2}{2} - y'_C \right) \sin \varphi \right]$$

$$\mu = k \left[ - \left( \frac{x'_1 + x'_2}{2} - x'_C \right) \sin \varphi + \left( \frac{y'_1 + y'_2}{2} - y'_C \right) \cos \varphi \right]$$

$$b' \sin \psi = - \frac{x'_1 - x'_2}{2} \sin \varphi + \frac{y'_1 - y'_2}{2} \cos \varphi$$

Данные измерений, получаемые в результате обработки телевизионного изображения стержня, представляют собой координаты точек  $B'_1$  и  $B'_2$ , выраженные через индексы совпадающих с ними пикселов, и моменты времени, к которым эти координаты относятся. Время отсчитывается от момента запуска программы обработки изображения. По формулам, указанным выше, индексы пикселов пересчитываются в переменные  $\lambda, \mu$  и  $\psi$ . Полученные числа будем называть псевдоизмерениями этих переменных. Псевдоизмерения, отвечающие моменту времени  $t_i$  ( $i = 1, 2, \dots; t_1 < t_2 < \dots$ ), обозначим  $\lambda^{(i)}, \mu^{(i)}, \psi^{(i)}$ . В результате на каждом цикле работы алгоритма определения движения имеется следующая информация:  $t_i, \lambda^{(i)}, \mu^{(i)}, \psi^{(i)}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ).

Псевдоизмерения содержат ошибки, поэтому для истинного движения стержня, описываемого функциями  $\lambda(t), \mu(t)$  и  $\psi(t)$ , имеют место лишь соотношения  $\lambda(t_i) \approx \lambda^{(i)}, \mu(t_i) \approx \mu^{(i)}, \psi(t_i) \approx \psi^{(i)}$ . Полагаем, что истинное движение описывается формулами (3.1), (3.2), но значения входящих в эти формулы постоянных  $c_1, \dots, c_6$  неизвестны. В рамках сделанного допущения определение движения стержня сводится к определению указанных постоянных из полученных псевдоизмерений. Эта задача решается стандартным методом наименьших квадратов.

Для определения  $c_1, \dots, c_4$  решаются две однотипные задачи. В результате решения каждой такой задачи находятся две постоянные. Рассмотрим, например, определение

постоянных  $c_1, c_2$  по псевдоизмерениям  $\lambda^{(i)}$ . Следуя методу наименьших квадратов, составим систему нормальных уравнений. Она имеет вид

$$c_1 \sum_{i=1}^N u_i^2 + c_2 \sum_{i=1}^N u_i v_i = \sum_{i=1}^N \lambda^{(i)} u_i$$

$$c_1 \sum_{i=1}^N u_i v_i + c_2 \sum_{i=1}^N v_i^2 = \sum_{i=1}^N \lambda^{(i)} v_i$$

$$u_i = e^{-\alpha_1 t_i} \cos \omega_1 t_i, \quad v_i = e^{-\alpha_1 t_i} \sin \omega_1 t_i$$

Из этой системы находим  $c_1$  и  $c_2$ . Аналогичным образом по псевдоизмерениям  $\mu^{(i)}$  находим  $c_3$  и  $c_4$ .

Определение  $c_5$  и  $c_6$  по псевдоизмерениям  $\psi^{(i)}$  выполняется более сложно. Сначала строится аппроксимация этих псевдоизмерений функцией (ср. (3.1)):

$$\psi = e^{-\alpha_3 t} (c_5 \cos \omega_3 t + c_6 \sin \omega_3 t) \quad (4.3)$$

Построение выполняется также, как в случае псевдоизмерений  $\lambda^{(i)}$  и  $\mu^{(i)}$ . Затем по найденным  $c_5, c_6$  и формуле (3.2) вычисляется  $\omega_3'$ , и с использованием  $\omega_3'$  вместо  $\omega_3$  аппроксимация псевдоизмерений  $\psi^{(i)}$  выражением (4.3) строится еще раз. При этом величина  $c_5^2 + c_6^2$  практически не меняется, а величины  $c_5, c_6$  могут измениться значительно. На заключительном этапе  $c_5$  и  $c_6$  уточняются методом Гаусса – Ньютона из условия аппроксимации псевдоизмерений  $\psi^{(i)}$  выражением (3.2). Выполняется, как правило, не более двух итераций этого метода.

Таким образом, определение движения стержня по каждой моде его колебаний производится независимо. Описанный способ определения постоянных  $c_1, \dots, c_6$  является базовым, хотя для разных случаев управления манипулятором он реализован по-разному.

**5. Анализ движения стержня.** В последнем сценарии экспериментов на описываемой установке предусмотрено возникновение нескольких ситуаций, требующих дополнительного статистического анализа данных измерений для понимания происходящего.

*Распознавание свободного движения стержня.* В момент запуска управляющей программы экспериментатор удерживает стержень рукой в неподвижном состоянии. При этом обе нити подвеса натянуты, манипулятор находится в исходном положении на границе области, в которой должен двигаться стержень. Удержание стержня может продолжаться произвольно долго, и управляющая программа должна "понимать", что стержень не свободен. После освобождения стержня управляющая программа должна определить момент начала его свободного движения и соответствующие начальные условия.

Распознавание свободного движения выполняется следующим образом. Управляющая программа выдает в цикле заказа зрительной системе проводить измерения на отрезке времени длиной 0,1 с. На таком отрезке, как правило, удается получить три момента времени с измерениями. По этим измерениям рассчитываются псевдоизмерения, которые копятя в массивах, и как только массивы заполняются – обычно их длина принимается равной 8, делается попытка определить движение стержня по методике, описанной в п. 4. Эта попытка характеризуется тремя положительными числами  $S_1, S_2$  и  $S_3$  – остаточными суммами квадратов для каждой моды колебаний стержня. Затем делается попытка аппроксимировать псевдоизмерения, отвечающие каждой моде, линейной функцией времени. Для каждой моды строится своя линейная функция, построение выполняется обычным методом наименьших квадратов. Для линейной аппроксимации также вычисляются остаточные суммы квадратов  $S_1', S_2'$  и  $S_3'$ . Движение стержня считается свободным, если для каждого  $i = 1, 2, 3$  выполнено хотя

бы одно из неравенств  $S_i < S'_i$ ,  $S_i < \epsilon_i$ . Здесь  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  и  $\epsilon_3$  заданные пороговые величины, обычно принимается  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0,0006 \text{ мм}^2$ ,  $\epsilon_3 = 0,0006$ .

Сформулированное условие означает, что движение стержня считается свободным, если для каждой моды  $\lambda$ ,  $\mu$  и  $\psi$  либо мала остаточная сумма квадратов при аппроксимации соответствующих псевдоизмерений подходящим выражением (3.1) или (3.2), либо такая аппроксимация лучше линейной. Эксперименты показали, что использование в критерии свободного движения только первого из этих условий недостаточно — среднеквадратичные ошибки аппроксимации псевдоизмерений выражениями (3.1), (3.2) сильно меняются от одного свободного движения к другому. В такой ситуации необходимо ввести дополнительный масштаб для оценки  $S_i$ , связанный только с обрабатываемой порцией данных. Величины  $S'_i$  служат именно этой цели.

Если движение стержня определено как несвободное, то цикл обращений к зрительной системе с шагом 0,1 с продолжается. На каждом таком шаге сначала самые старые псевдоизмерения удаляются из массивов и заменяются новыми так, чтобы длина массивов оставалась неизменной. Затем выполняется обработка хранящихся в массивах псевдоизмерений двумя способами: 1) с использованием соотношений (3.1), (3.2); 2) с использованием линейных функций времени и так далее.

Для надежного распознавания свободного движения стержня требуется дважды подряд успешно выполнить описанный тест. Если движение стержня определено как свободное, то упомянутый выше цикл обращений к зрительной системе прерывается. В этот момент уже известны характеризующие движение стержня и определенные постоянные  $c_1, \dots, c_6$ . Знание этих постоянных позволяет сделать прогноз движения стержня и определить момент и условия его захвата.

Расчет условий захвата стержня, передача необходимых команд манипулятору и выполнение захвата занимают около 1 с. В это время обращений к зрительной системе не происходит. Если прогнозируемый момент захвата отстоит от момента завершения прогноза более чем на 1,5 с, то управляющая программа выдает заказ зрительной системе провести измерения на отрезке времени длиной 0,4 с или более. Затем эти измерения обрабатываются по методике п. 4, и момент и условия захвата вычисляются заново по более свежим данным. Если же прогнозируемый момент захвата отстоит от текущего момента менее чем на 1,5 с, то перевычисление момента и условий захвата не производится.

При возникновении интервала с дополнительными измерениями на этом интервале можно успеть провести еще один эксперимент — можно нарушить свободные колебания стержня, ударив по нему или захватив его рукой. Управляющая программа должна "понять" это и прекратить реализацию прежнего плана захвата.

*Распознавание нарушения свободного движения стержня.* На дополнительном интервале измерений управляющая программа выдает в цикле заказ зрительной системе проводить измерения на отрезке времени длиной 0,05 с. На таком отрезке, как правило, удается выполнить измерения лишь в один момент времени. Для полученных моментов  $t_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) вычисляются величины

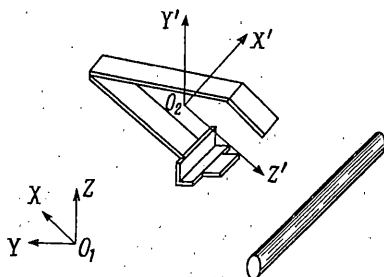
$$r_i = \sqrt{[\lambda^{(i)} - \lambda(t_i)]^2 + [\mu^{(i)} - \mu(t_i)]^2 + b^2 [\psi^{(i)} - \psi(t_i)]^2}$$

где  $\lambda(t_i)$ ,  $\mu(t_i)$  и  $\psi(t_i)$  рассчитываются по формулам (3.1), (3.2) для найденных при определении свободного движения значений постоянных  $c_1, \dots, c_6$ . Величины  $r_i$  записываются в массив.

После того, как накопится 8 таких величин для моментов  $t_1 < t_2 < \dots < t_8$ , методом наименьших квадратов строятся аппроксимации точек  $(t_i, r_i)$  линейной функцией времени  $r = \alpha + \beta t$  и постоянной функцией  $r = \alpha$ . Остаточные суммы квадратов для этих аппроксимаций обозначим соответственно  $S_l$  и  $S_c$ .

Если выполнено хотя бы одно из неравенств  $S_l/6 < \delta S_c/7$ ,  $\beta > \beta_0$ , где  $\delta$  и  $\beta_0$  заданные положительные числа (обычно  $\delta = 0,01$  и  $\beta_0 = 50 \text{ мм/с}$ ), то считается, что нарушение





Фиг. 2

свободного движения стержня на отрезке  $t_1 \leq t \leq t_8$  имело место. В этом случае начинает работать алгоритм определения начала свободного движения.

В противном случае принимается, что на отрезке времени  $t_1 \leq t \leq t_4$  движение стержня было продолжением его свободного движения, определенного ранее. Псевдоизмерения, рассчитанные для моментов  $t_1, \dots, t_4$  присоединяются к псевдоизмерениям, накопленным на этапе определения свободного движения и по всей этой

совокупности данных выполняется новое определение постоянных  $c_1, \dots, c_6$ . Затем опять управляющая программа выдает в цикле заказ зрительной системе проводить измерения на отрезке времени длиной 0,05 с. После того, как будет получено 4 новых момента с измерениями, они добавляются к 4 моментам, оставшимся от предыдущего цикла измерений, и над этой совокупностью выполняются те же операции, какие были описаны выше, и т.д.

Эксперименты показали надежность описанного алгоритма, однако в описанную выше схему он укладывается плохо — слишком мало времени имеет экспериментатор для возмущения движения стержня. Для испытания алгоритма вводилась искусственная задержка захвата стержня. В этом случае экспериментатор имел достаточно времени, чтобы успеть нарушить свободные колебания стержня.

*Распознавание захвата стержня манипулятором.* Управляющая программа после закрытия схвата выдает в цикле заказ зрительной системе проводить измерения на отрезке времени длиной 0,1 с. Захват считается выполненным успешно, если для 5 измерений подряд рассчитанное на момент захвата изображение средней точки схвата манипулятора в картинной плоскости камеры будет лежать на расстоянии, не превосходящем заданный предел, от отрезка прямой, соединяющего реальные изображения точек  $B_1$  и  $B_2$ . В этом случае управляющая программа обеспечивает выведение стержня манипулятором в положение покоя, раскрытие схвата и затем увод манипулятора в исходное положение. Если же в течение 1 с захват не распознан, то попытка схватить стержень считается неудачной, и начинает работать алгоритм определения свободного движения стержня.

**6. Прогноз положения стержня при захвате и времени захвата.** При создании последнего варианта описываемой экспериментальной установки было поставлено условие: захват движущегося стержня манипулятором желательно выполнить на первом же его качании по моде  $\lambda$ . Это условие во многом определило алгоритм захвата. На стержне было выбрано 7 точек, разбивающих его на 8 равных отрезков. Для каждой из этих точек рассчитывались благоприятные обстоятельства наиболее раннего возможного захвата, и захват выполнялся за ту точку, для которой этот момент оказывался самым ранним.

В момент захвата продольная ось схвата манипулятора (ось  $Z'$  связанной со схватом системы координат  $O_2X'Y'Z'$ , фиг. 2) почти горизонтальна и располагается в плоскости, перпендикулярной стержню. Чтобы захват происходил без удара, проекция скорости захватываемой точки на эту ось в момент схватывания должна быть нулевой. Из-за сложной конфигурации стенда точный способ расчета соответствующего момента захвата довольно громоздок, поэтому в управляющей программе реализован приближенный способ. Его можно описать следующим образом. Момент захвата выбирается так, чтобы скорость изображения точки захвата в картинной плоскости камеры была направлена вдоль изображения стержня. Последнее условие легко формализовать.

Пусть  $l$  координата точки захвата на стержне, отсчитываемая от его середины

(такие координаты точек  $B_1$  и  $B_2$  равны соответственно  $b$  и  $-b$ ). Тогда момент захвата определяется уравнением  $-\lambda \sin \psi + \mu \cos \psi + h\psi' = 0$ .

Если амплитуда колебаний стержня не превышает  $60^\circ$ , то это уравнение решается численно для каждой из указанных семи точек. Для каждой точки перебором нескольких корней выпященного уравнения находится наиболее ранний возможный момент захвата. При этом учитываются геометрические ограничения на позицию манипулятора в момент захвата и кинематические ограничения на время выхода в нее (см. ниже). Захват производится за точку, для которой найденный описанным способом момент захвата оказывается самым ранним. Если же амплитуда колебаний стержня превышает  $60^\circ$ , то для захвата выбирается одна из двух крайних точек рассматриваемой семерки. Такое правило установлено для исключения столкновений стержня с манипулятором. Пороговое значение амплитуды в  $60^\circ$  подобрано эмпирически.

При управлении манипулятором используются две жестко связанные с его звеньями системы координат: система  $O_1XYZ$  (фиг. 1), связанная с основанием, и система  $O_2X'Y'Z'$  (фиг. 2), связанная со схватом. Чтобы манипулятор в нужный момент времени захватил стержень за одну из семи точек, вычисляются координаты точек  $B_1$ ,  $B_2$  в системе  $O_1XYZ$  на этот момент и указывается номер точки захвата. По этой информации рассчитывается требуемая позиция манипулятора.

*Расчет координат точек  $B_1$  и  $B_2$  в системе  $O_1XYZ$ .* Введем обозначения  $\|a_{ij}\|_{i,j=1}^3$  – матрица перехода от введенной в п. 3 системы  $Oxyz$  к системе  $O_1XYZ$ ;  $(X_1, Y_1, Z_1)$  и  $(X_2, Y_2, Z_2)$  – координаты точек  $B_1$  и  $B_2$  в системе  $O_1XYZ$ ;  $(X_i^0, Y_i^0, Z_i^0)$  и  $(X_i^2, Y_i^2, Z_i^2)$  – те же координаты в положении покоя стержня. Справедливы соотношения

$$\begin{aligned} X_i &= X_i^0 + a_{11}\xi_i + a_{12}\eta_i + a_{13}\zeta_i \\ Y_i &= Y_i^0 + a_{21}\xi_i + a_{22}\eta_i + a_{23}\zeta_i \\ Z_i &= Z_i^0 + a_{31}\xi_i + a_{32}\eta_i + a_{33}\zeta_i \quad (i=1,2) \end{aligned}$$

Матрица перехода и координаты точек  $B_1$  и  $B_2$  в положении покоя стержня находятся в результате юстировки, описанной в п. 7. Величины  $\xi_i$ ,  $\eta_i$  и  $\zeta_i$  вычисляются по величинам  $\lambda$ ,  $\mu$  и  $\psi$ , представляемым соотношениями (3.1), (3.2), в которых значения постоянных  $c_1, \dots, c_6$  определяются с помощью алгоритма, описанного в п. 4.

*Расчет ориентации схвата.* В момент захвата ось  $O_2X'$  должна быть параллельна вектору  $B_2B_1$ , ось  $O_2Z'$  составляет угол в  $100^\circ$  с осью  $O_1Z$ . Значение  $100^\circ$  подобрано эмпирически для предотвращения столкновения стержня со схватом.

Опишем проверку возможности перехода манипулятора из начального положения в позицию захвата к моменту времени захвата  $t_c$ . Пусть проверка начинается в момент  $t_r$ . Значение  $t_r$  определяется по таймеру ПЭВМ. Переход считается возможным, если разность  $t_c - t_r$  превышает расчетное время перехода  $\tau$ . Последнее находится по формуле  $\tau = \tau_0 + \tau_1 + \tau_2$ , где  $\tau_0$  – главный член, определяемый расстоянием  $d$  между положениями центра схвата в начальной и конечной позициях,  $\tau_1$  – поправка, зависящая от изменения ориентации схвата при переходе,  $\tau_2$  – время, необходимое для передачи команд из ПЭВМ в стойку управления манипулятором и обработки команд в стойке. Вид каждого из этих слагаемых был определен экспериментально. Оказалось, что  $\tau_0 = \tau_0(d)$  – кусочно постоянная функция,  $\tau_1$  – равно либо нулю, либо  $0,1$  с и зависит от угла поворота системы  $O_2X'Y'Z'$  между ее конечным и начальным положениями,  $\tau_2 = 0,27$  с – постоянная величина. Максимальная скорость движения центра схвата выбрана равной  $0,7$  м/с, расстояние между начальным положением центра схвата и его конечным положением для

данного стенда не превышает 0,6 м. В этом случае  $0,47 \text{ с} \leq \tau_0 \leq 1 \text{ с}$ , и время перехода лежит в пределах от 0,74 с до 1,37 с.

Описанная проверка делается для каждой из семи или двух точек стержня, за которые предполагается его схватить. После того, как время захвата  $t_c$  выбрано окончательно, находится время ожидания перед выходом в позицию захвата  $\tau_w = t_c - t_r - \tau$ . Если  $\tau_w > 0,35 \text{ с}$ , то производится уточнение прогноза без изменения точки захвата — выдается заказ зрительной системе наблюдать стержень на отрезке времени длиной  $(\tau_w - 0,05 \text{ с})$ , после его выполнения новые данные измерений обрабатываются по методике п. 4, и момент и позиция захвата вычисляются заново. При  $\tau_w < 0,35 \text{ с}$  уточнения прогноза не производится. Затем выдается команда на движение робота в позицию захвата, и выполнение основной программы ПЭВМ приостанавливается. Оно возобновляется в момент  $t_c$  выдачей команды на закрытие схвата. Прямое управление схватом из ПЭВМ по параллельному каналу, минуя стойку управления, используется для более точной по времени выдачи этой команды.

После срабатывания схвата проводится анализ выполнения захвата с помощью алгоритма, описанного в п. 5. В случае неудачной попытки захвата манипулятор отводится в исходное положение и осуществляется повторная попытка захвата, начиная с этапа определения свободного движения стержня. Так продолжается до тех пор, пока стержень не будет захвачен.

Оценим минимальное время, необходимое для захвата стержня после начала свободного движения. Для определения программой факта начала свободного движения требуется порядка 0,3 с. Выше оценено минимальное время, которое требуется роботу на выход в точку захвата — 0,74 с. Таким образом, минимальное суммарное время на захват составляет 1,04 с. Поскольку период колебаний стержня по модам  $\lambda$  и  $\mu$  составляет около 3 с, то, в принципе, захват стержня может быть выполнен на первом полупериоде свободных колебаний по этим модам. Эксперименты позволили найти положения стержня, при начале движения из которых захват реализуется именно таким образом. Были также найдены положения, при начале движения из которых захват требует примерно 4,5 с.

**7. Юстировка стенда.** Для настройки описываемой системы выполняются две независимые юстировки. Одна из них служит для определения параметров модели движения стержня  $\omega_i, \alpha_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), параметра  $b'$  и параметров, связывающих системы координат  $O'x'y'$  и  $C\xi\eta'$  из п. 4, другая — для определения матрицы перехода между системами координат  $Oxyz$  и  $O_1XYZ$  (см. пп. 3, 5) и координат точек  $B_1, B_2$  в системе  $O_1XYZ$ .

Рассмотрим первую из указанных юстировок. Она состоит в обработке данных измерений, полученных во время свободных колебаний стержня на интервале времени длиной 20–30 с. В результате обработки этих измерений определяются не только величины, характеризующие движение стержня — в данном случае  $c_5, c_6$  и  $c_1/k, \dots, c_4/k$ , но и параметры его уравнений движения и математической модели измерений. Юстировка выполняется в два этапа. На первом этапе обрабатываются псевдоизмерения, отвечающие отдельным модам колебаний стержня, и находятся грубые оценки параметров  $\omega_i, \alpha_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ),  $b', x_c, y_c, \varphi$  и начальных условий движения. На втором этапе выполняется совместная обработка всех измерений, в результате которой эти грубые оценки уточняются. На обоих этапах обработка выполняется стандартным методом наименьших квадратов.

Первый этап начинается с обработки псевдоизмерений, отвечающих моде крутильных колебаний стержня вокруг оси  $Oz$  (по углу  $\psi$ ). Эта обработка выполняется с использованием соотношений (3.2) и (4.3), но подготовка псевдоизмерений проводится несколько иначе, чем описано в п. 4. Как уже отмечалось, в допустимых движениях стержня на стенде переменные  $\lambda$  и  $\mu$  малы, поэтому для тангенса угла  $\theta$  между

отрезком  $B_2B_1'$  и осью  $O'x'$  можно получить приближенное выражение

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{y_1' - y_2'}{x_1' - x_2'} \approx \operatorname{tg}(\varphi + \psi) \quad (7.1)$$

Отсюда  $\theta \approx \varphi + \psi$ . В силу полученных соотношений зависимость угла  $\theta$  от времени в рамках линейной теории дается формулой (ср. (4.3))

$$\theta = a_0 + e^{-\alpha_3 t} (a_1 \cos \omega_3 t + a_2 \sin \omega_3 t) \quad (7.2)$$

$$a_0 = \varphi, \quad a_1 = c_5, \quad a_2 = c_6$$

Приведенные соотношения используются следующим образом. Данные измерений по формулам п. 4 переводятся в координаты точек  $B_1'$  и  $B_2'$  в системе  $O'x'y'$ , затем по этим координатам с помощью формулы (7.1) рассчитываются псевдоизмерения угла  $\theta$ . Обработка псевдоизмерений методом наименьших квадратов выполняется в две стадии. На первой используется формула (7.2). Определению подлежат 5 параметров:  $\omega_3$ ,  $\alpha_3$ ,  $a_0$ ,  $a_1$  и  $a_2$ . Сначала минимизация критерия качества обработки выполняется случайным поиском. Критерий, зависящий только от  $\omega_3$  и  $\alpha_3$ , строится следующим образом. При заданных  $\omega_3$  и  $\alpha_3$  параметры  $a_0$ ,  $a_1$  и  $a_2$  находятся из линейной задачи метода наименьших квадратов, остаточная сумма квадратов и есть критерий качества. Затем минимизация по пяти параметрам выполняется стандартным методом Гаусса – Ньютона. После того, как построена аппроксимация псевдоизмерений угла  $\theta$  с помощью соотношения (7.2), выполняется вторая стадия. Она заключается в построении аппроксимации тех же данных с помощью соотношения  $\theta = a_0 + \psi$ , где  $\psi$  определено формулой (3.2). По-прежнему используются метод наименьших квадратов и метод Гаусса – Ньютона, уточняются те же 5 параметров.

Одновременно с расчетом координат точек  $B_1'$  и  $B_2'$  вычисляется среднее значение длины отрезка  $B_1'B_2'$ . Половина этого среднего значения служит оценкой параметра  $b'$ . В результате всех описанных расчетов находятся оценки параметров  $b'$ ,  $\omega_3$ ,  $\alpha_3$ ,  $\varphi = a_0$ ,  $c_5$  и  $c_6$ .

Вид псевдоизмерений, отвечающих продольной и поперечной модам колебаний стержня, устанавливается на основании следующих соотношений, которые можно вывести из формул пп. 3, 4:

$$\begin{aligned} \frac{x_1' + x_2'}{2} \cos \varphi + \frac{y_1' + y_2'}{2} \sin \varphi &= x_C' \cos \varphi + y_C' \sin \varphi + \frac{\lambda}{k} \\ -\frac{x_1' + x_2'}{2} \sin \varphi + \frac{y_1' + y_2'}{2} \cos \varphi &= -x_C' \sin \varphi + y_C' \cos \varphi + \frac{\mu}{k} \end{aligned}$$

Введя обозначения

$$a_0 = x_C' \cos \varphi + y_C' \sin \varphi, \quad a_0' = -x_C' \sin \varphi + y_C' \cos \varphi$$

$$a_1 = c_1 / k, \quad a_2 = c_2 / k, \quad a_1' = c_3 / k, \quad a_2' = c_4 / k$$

последние соотношения можно переписать так

$$\frac{x_1' + x_2'}{2} \cos \varphi + \frac{y_1' + y_2'}{2} \sin \varphi = a_0 + e^{-\alpha_1 t} (a_1 \cos \omega_1 t + a_2 \sin \omega_1 t)$$

$$-\frac{x_1' + x_2'}{2} \sin \varphi + \frac{y_1' + y_2'}{2} \cos \varphi = a_0' + e^{-\alpha_2 t} (a_1' \cos \omega_2 t + a_2' \sin \omega_2 t)$$

Левые части полученных формул определяют вид псевдоизмерений, отвечающих

продольной и поперечной модам колебаний стержня и рассчитываемых по координатам точек  $B'_1$  и  $B'_2$  в системе  $O'x'y'$ . В качестве значения угла  $\varphi$  в расчетах используется его оценка, найденная описанным выше способом. Правые части полученных формул определяют математические модели, с помощью которых эти псевдоизмерения обрабатываются методом наименьших квадратов. Обработка проводится точно так же, как на первой стадии обработки псевдоизмерений угла  $\theta$ . В результате находятся оценки параметров:  $\omega_1, \omega_2, \alpha_1, \alpha_2, c_1/k, \dots, c_4/k, x'_C = a_0 \cos \varphi - a'_0 \sin \varphi$  и  $y'_C = a_0 \sin \varphi + a'_0 \cos \varphi$ . Первый этап юстировки завершен.

Второй этап основан на соотношениях (ср. п. 4):

$$x'_1 = x'_C + \left( \frac{\lambda}{k} + b' \cos \psi \right) \cos \varphi - \left( \frac{\mu}{k} + b' \sin \psi \right) \sin \varphi$$

$$y'_1 = y'_C + \left( \frac{\lambda}{k} + b' \cos \psi \right) \sin \varphi + \left( \frac{\mu}{k} + b' \sin \psi \right) \cos \varphi$$

$$x'_2 = x'_C + \left( \frac{\lambda}{k} - b' \cos \psi \right) \cos \varphi - \left( \frac{\mu}{k} - b' \sin \psi \right) \sin \varphi$$

$$y'_2 = y'_C + \left( \frac{\lambda}{k} - b' \cos \psi \right) \sin \varphi + \left( \frac{\mu}{k} - b' \sin \psi \right) \cos \varphi$$

Эти соотношения вместе с формулами (3.1), (3.2) выражают модель, с помощью которой измерения – координаты точек  $B'_1$  и  $B'_2$  в системе  $O'x'y'$  – обрабатываются методом наименьших квадратов. Минимизация критерия качества обработки выполняется методом Гаусса – Ньютона, определяются параметры:  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, c_1/k, \dots, c_4/k, c_5, c_6, x'_C, y'_C, \varphi, b'$ . Начальными приближениями определяемых параметров служат их значения, найденные в результате обработки псевдоизмерений отдельных мод. После того, как перечисленные параметры найдены, определяется параметр  $k = b/b'$ . Здесь значение  $b$  находится непосредственным измерением стержня.

Приведем некоторые характеристики точности юстировки. Оцифровываемая область на ПЗС-матрице камеры имеет размеры  $6,8 \times 5,2$  мм, длина изображения стержня – 3,7 мм, среднеквадратичная ошибка аппроксимации данных измерений координат  $x'_1, y'_1, x'_2, y'_2$  примерно 0,01–0,03 мм. Частоты колебаний стержня  $\omega_1 \approx \omega_2 \approx 2,1 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_3 \approx 3,3 \text{ с}^{-1}$ , среднеквадратичные отклонения этих частот – не более  $0,005 \text{ с}^{-1}$ . Коэффициенты затухания  $\alpha_1, \alpha_2$  и  $\alpha_3$  лежат в пределах  $0,005\text{--}0,015 \text{ с}^{-1}$ , среднеквадратичные отклонения этих коэффициентов не превышают  $0,003 \text{ с}^{-1}$ .

Опишем теперь вторую юстировку, состоящую в определении матрицы перехода между системами координат  $Oxyz$  и  $O_1XYZ$  и координат точек  $B_1, B_2$  в системе  $O_1XYZ$ . На стержне на одинаковых расстояниях  $l = 7$  см от его концов отмечаются точки  $C_1$  и  $C_2$ . Схват манипулятора можно подводить к этим точкам, и с экрана стойки управления "Сфера-36" считывать их координаты в системе  $O_1XYZ$ . Бифилярный подвес снабжен электроприводом, позволяющим независимо изменять длину каждой его нити. Используя эту возможность, с помощью уровня можно выравнивать высоты точек  $C_1$  и  $C_2$  с погрешностью не более 1 мм.

Сначала стержень поднимается и устанавливается горизонтально в таком высоком положении, в каком еще можно подвести схват к точкам  $C_1$  и  $C_2$ . Радиусы-векторы этих точек в системе  $O_1XYZ$  обозначим соответственно  $\mathbf{r}_1$  и  $\mathbf{r}_2$ ; их компоненты считываются с экрана стойки. Затем стержень опускается и устанавливается горизонтально

в таком низком положении, в каком еще можно подвести схват к точке  $C_1$ . Радиус-вектор этой точки в системе  $O_1XYZ$  обозначим  $\mathbf{r}_1$ . Компоненты этого вектора также считываются с экрана стойки. Если пренебречь ошибками в установке стержня в горизонтальном положении и определении координат точек  $C_1$  и  $C_2$  с помощью схвата (эти ошибки не превышают 1 мм), то можно утверждать следующее. Плоскость, проходящая через концы векторов  $\mathbf{r}_1$ ,  $\mathbf{r}_2$  и  $\mathbf{r}'_1$ , совпадает с плоскостью  $Oxz$ , отрезок, проходящий через концы векторов  $\mathbf{r}_1$  и  $\mathbf{r}'_1$ , вертикален, т.е. параллелен оси  $Oz$ . На основании этих двух утверждений и априорной информации о направлении осей систем координат  $Oxyz$  и  $O_1XYZ$  рассчитываем компоненты ортов системы  $Oxyz$  в системе  $O_1XYZ$ :

$$\mathbf{e}_3 = \frac{\mathbf{r}'_1 - \mathbf{r}_1}{|\mathbf{r}'_1 - \mathbf{r}_1|} = (a_{13}, a_{23}, a_{33})$$

$$\mathbf{e}_1 = \frac{\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 - [(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \cdot \mathbf{e}_3] \mathbf{e}_3}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 - [(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \cdot \mathbf{e}_3] \mathbf{e}_3|} = (a_{11}, a_{21}, a_{31})$$

$$\mathbf{e}_2 = \mathbf{e}_3 \times \mathbf{e}_1 = (a_{12}, a_{22}, a_{32})$$

В результате находим матрицу перехода  $\|a_{ij}\|_{i,j=1}^3$ .

Координаты точек  $B_1$  и  $B_2$  в системе  $O_1XYZ$  совпадают с компонентами радиусов-векторов

$$(1+p)\mathbf{r}_1 - p\mathbf{r}_2 + d\mathbf{e}_3, \quad (1+p)\mathbf{r}_2 - p\mathbf{r}_1 + d\mathbf{e}_3, \quad p = \frac{l}{2(b-l)}$$

где  $d$  – расстояние между рабочим положением стержня и его верхним положением при юстировке. Это расстояние вычисляется по считываемым с экрана стойки координатам точки  $C_1$  в этих положениях.

**8. Заключение.** В описанных экспериментах использовался манипулятор с позиционной системой управления, причем максимальная скорость его схвата примерно совпадала с максимальной скоростью средней точки стержня. Эксперименты показали, что даже с такой системой управления манипулятор может автоматически захватить движущийся неизвестным образом стержень, если в контур управления манипулятора включить систему технического зрения с алгоритмами обработки зрительной информации, основанными на модели движения захватываемого объекта. С помощью динамической модели стержня удалось не только определять и прогнозировать его фактическое движение, но и анализировать некоторые нетривиальные случаи изменения этого движения.

Основное ограничение примененного подхода состоит в необходимости разработки довольно сложной модели движения для каждого объекта манипулирования. Однако можно надеяться, что для манипуляторов с более совершенными системами управления такие модели могут быть более простыми и универсальными.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 96-01-01003).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ioki M., Wakabayashi Y. Design and preliminary test results of advanced space tele-robotic testbed // Proc. 7th Intern. Conf. on Advanced Robotics (ICAR-95). Catalonia, Spain, 1995. P. 317–323.
2. Kelly R. Stable direct visual feedback control of fixed-eye planar robots without camera calibration // Proc. 7th Intern. Conf. on Advanced Robotics (ICAR-95). Catalonia, Spain, 1995. P. 245–252.

3. *Nagamatsu H., Kubota T., Nakatani I.* Capture strategy for retrieval of a tumbling satellite by a space robotic manipulator // Proc. 1996 IEEE Intern. Conf. on Robotic and Automation, Minneapolis, Minnesota: IEEE, 1996. P. 70–75.
4. *Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Белоусов И.Р., Богуславский А.Н., Боровин Г.К., Емельянов С.Н., Комаров М.М., Сазонов В.В., Соколов С.М.* Автоматический захват подвижного объекта роботом-манипулятором. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. № 78. 1996. 24 с.
5. *Okhotsimsky D.E., Platonov A.P., Belousov I.R., Boguslavsky A.A., Borovin G.K., Emel'yanov S.N., 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.

Москва

Поступила в редакцию  
1.III.1998