

МНОГОФАЗНЫЙ МЕТОД И АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ СБОРОЧНЫХ РОБОТОВ

А. И. Бурдыгин, Ф. М. Кулаков, А. И. Нечаев, С. Э. Чернакова

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
199178, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., д.39
kul.iias.spb.su

УДК 681.3

А. И. Бурдыгин, Ф. М. Кулаков, А. И. Нечаев, С. Э. Чернакова. Многофазный метод и алгоритм измерения пространственных координат объектов для обучения сборочных роботов // Труды СПИИРАН. Вып. 1, т. 2 — СПб: СПИИРАН, 2002.

Аннотация. *Представлен результат исследований Многофазного метода и робастного алгоритма управления нечеткой логики, основанных на Модели памяти формы с визуальным наведением для сборочных роботов применительно к задаче измерения координат для автономных сборочных роботов и космических манипуляторов.*

Также, представлены разработанное программное обеспечение и аппаратура оптической телевизионной системы, используемой в том числе для 6-ти координатной задающей перчатки управления роботом в режиме реального времени, и результаты экспериментальных исследований динамических параметров и оценки точности оптико-телевизионной системы, а также, экспериментов по использованию метода обучения показом для сборочного манипулятора.

Данная работа поддержана Проектом INTAS № 96-049 «Сборочная робототехника, робастное сило-моментное управление, оптимальное планирование, основанное на нечеткой логике». — Библиограф. 22 назв.

UDC 681.3

A. I. Burdygin, F. M. Kulakov, A. I. Nechaev, S. E. Chernakova. A multiphase method and algorithm of measurement the spatial coordinates of objects for teaching of assembly robots // SPIIRAS Proceedings. Issue 1, v. 2. — SPb: SPIIRAS, 2002.

Abstract. *The researches of the Multiphase Method and the robust control algorithm of the fuzzy logic, based on the Model Memory of the Shape for assembly robots with reference to the task of measurement of coordinates for the autonomous assembly robots and the space manipulators is submitted.*

Also, there are submitted the software and the instrumentation of the optical television system used for 6-coordinates assigning glove for the control of the robot in a real time mode, and outcomes of experimental researches of dynamic parameters and estimations of accuracy of the optic-television system, and also, the experiments on usage of a method of the teaching by a show for the assembly manipulators.

This paper is supported by the Project INTAS № 96-049 "Assembly robotics, robust force-torque control, optimal planing based on the fuzzy logic". — Bibl. 22 items.

1. Введение

В последнее время значительный прогресс достигнут в области СТЗ роботов реального времени. Разрабатываются быстрые сенсорные интерфейсы, упрощается конструкция и улучшается адаптируемость роботов, приближаясь к возможностям человеческих рук с их удивительно высоким коэффициентом полезной нагрузки относительно собственного веса и интерактивными сенсорными возможностями обратной связи, с использованием главным образом зрения и тактильной информации [10].

Для сборочных роботов захват объекта — задача, легко выполняемая человеком, может быть реализована с использованием задачно-ориентированной

СТЗ. Объект располагается произвольно в трехмерном рабочем пространстве робота. Использование робота-манипулятора робота для сборки требует обеспечения возможности захватывать различные детали в рабочем пространстве, для чего необходимо определять их пространственную ориентацию и позицию схвата относительно объектов.

На базе концепций объектно-ориентированного зрения [11], Мультиагентной системы и модели Конечного автомата [12], других новых идей "видения в движении" (активного видения) [13] разработаны некоторые имитационные модели и экспериментальные робототехнические системы для процесса сборки.

Цель данной работы состоит в том, чтобы автоматизировать процесс сборки роботами, и постепенно сделать его полностью автоматическим.

Сборочные роботы управляются путем интегрирования команд естественного языка, восприятие и действие являются основой для выполнения данных задач гибким и адекватным способом. Целенаправленное общение между обучающим оператором и роботом требует создания новых языков описания [14] и новых методов обучения показом для сборочных роботов [3].

Эта работа основана на исследовании нового Многофазного Метода (МФМ) измерения координат для автономных роботов и космических манипуляторов и исследовании алгоритмов управления нечеткой логики с Моделью Памяти Формы (МПФ) [6].

Некоторые результаты экспериментальных исследований динамических параметров и оценок точности измерений для условий реального времени приведены в приложении 1.

2. Описание многофазного метода

Основная проблема исследования, состоит в том, чтобы разработать адаптивный метод и алгоритм телевизионных измерений позиции и ориентации объекта для управления сборочными роботами по видео-информации.

Эта работа основана на предыдущих исследованиях оптико-телевизионных систем [1, 5–7] и отражает результаты исследований новых методов управления роботами с СТЗ, включая стерео-телевизионные системы. Стерео-телевизионные системы автоматического измерения обеспечивают выполнение следующих функций:

- измерение расстояния, размеров и ориентации объектов;
- создание модели трехмерных объектов;
- автоматическая навигация транспорта на открытой местности, изучение рельефа и отслеживание препятствий на маршруте;
- распознавание объектов в реальном времени по их трехмерным моделям.

Также, можно использовать стерео-систему измерения для следующего применения:

- автоматические системы управления движением различных транспортных средств;
- электронное отображение гео-информации и коррекции электронных карт в режиме реального времени;
- измерение расстояний и идентификация удаленных или недоступных объектов.

Процедура определения положения робота по входному изображению состоит из следующих шагов:

- поиск объекта в рабочей зоне с предобучением форме поисковых движений;

- распознавание объекта и оценки его ориентации с использованием модели объекта;
- поиск характерных точек объекта;
- измерение относительного положения и ориентации характерных точек объекта в координатах телекамеры;
- вычисление пространственного положения и ориентации объекта в координатах робота.

Расчет пространственных координат объекта при использовании одной телекамеры основан на решении системы нелинейных уравнений [2]:

$$\begin{cases} r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\varphi_{12}) = d_{12}, \\ r_1^2 + r_3^2 - 2r_1 r_3 \cos(\varphi_{13}) = d_{13}, \\ r_2^2 + r_3^2 - 2r_2 r_3 \cos(\varphi_{23}) = d_{23}, \end{cases} \quad (1)$$

где: r_1, r_2, r_3 — радиус-векторы реперов в системе координат телекамеры;
 d_{12}, d_{13}, d_{23} — расстояния между реперами;
 $\varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{23}$ — углы между направлениями на реперы.

Алгоритм управления движением робота с визуальным наведением в первом приближении реализуется в 4 этапа:

1. Расчет проекции расстояния (между позицией робота и заданной точкой) по направлению основной оси объекта (d_i) и размеру нормали (h_i) на эту ось.
2. Вращение схвата робота на расчетный угол (α_i):

$$\operatorname{tg}(\alpha_i) = 2h_i / d_i. \quad (2)$$

3. Коррекция движения схвата робота.

4. Контроль стереосистемой робота оставшегося до объекта расстояния.

Если ошибка наведения превышает допустимую, следует повторить шаги 1-4, с предварительным удалением от цели.

Координаты центра изображения рассчитываются аппаратно следующим образом [11]:

$$X = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n A_{ij} X_i}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n A_{ij}}; \quad Y = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n A_{ij} Y_j}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n A_{ij}}, \quad (3)$$

где X, Y — координаты центра изображения,
 X_i, Y_j — координаты пикселей изображения,
 A_{ij} — амплитуды пикселей видео сигнала;
 n, m — количество отсчетов яркости по строкам (n) и столбцам (m).

Погрешности определения угла ориентации объекта (σ_α) вычисляется следующим образом:

$$\sigma_\alpha = \sigma_\varphi d_{ob} / R_{ob} \operatorname{Cos}^{-1} \alpha, \quad (4)$$

где: σ_φ — угловая погрешность телекамеры,
 d_{ob} — расстояние до объекта,
 R_{ob} — радиус объекта.

Погрешность определения линейных перемещений (σ_x) для малых значений оценивается в первом приближении как:

$$\sigma_x \cong \sigma_\varphi d_{ob}, \quad (5)$$

где: σ_φ — угловая погрешность телекамеры,
 d_{ob} — расстояние до объекта.

Расчетная оценка погрешности стерео измерений, аналогично, может быть представлена в виде:

$$\sigma_d^2 \cong d_{ob}^2 \sigma_\varphi^2 (1 + (d_b / d_{ob} * 1 / \cos\varphi + d_{ob}/d_b)^2), \quad (6)$$

где: φ — угол между направлением оси телекамеры 2 и базовой линией;
 d_b — расстояние между телекамерами;
 d_{ob} — расстояние от телекамеры 1 до объекта;
 σ_φ — погрешность измерения угла φ ;
 σ_d — погрешность измерения расстояний.

В данном случае телекамеры находятся на расстоянии d_b друг от друга. Линия, их соединяющая — базовая. Оптическая ось телекамеры 1 направлена на объект под прямым углом к базовой линии. Ось телекамеры 2 направлена в сторону объекта под углом φ к базовой линии.

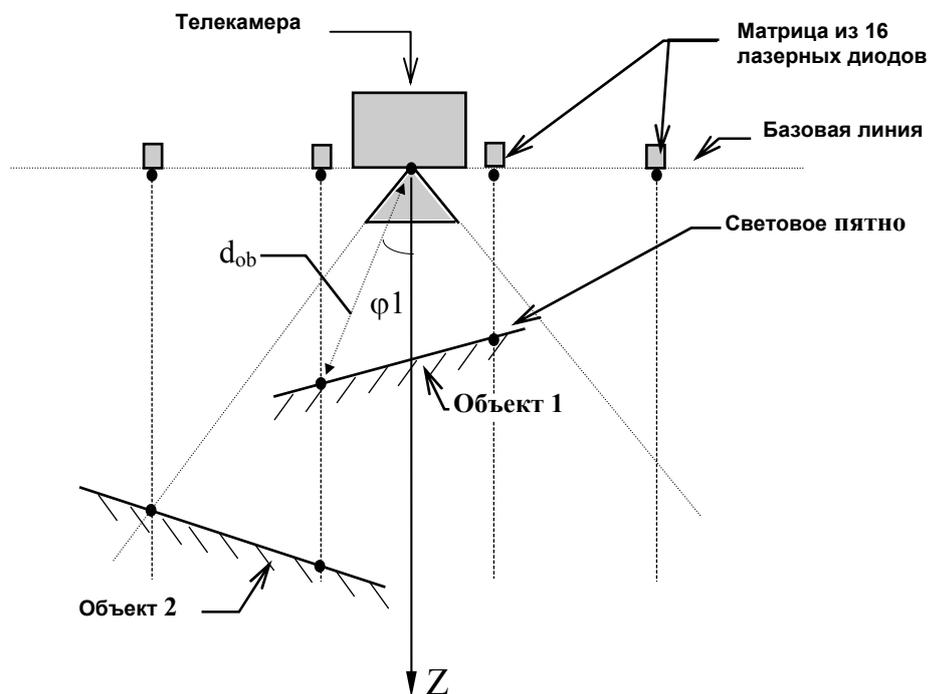


Рис. 1. Измерение расстояний с помощью матрицы лазерных диодов и телекамеры

Предварительные экспериментальные результаты оценки точности измерений координат точек объекта получены на макете стерео-системы для двух вариантов расстояний между телекамерами (базы) на 3-х расстояниях до объекта при быстродействии системы 7-10 Гц. Полученная погрешность не превышает 1% от величины дальности.

Также выполнены новые исследования с телекамерой, оборудованной матрицей лазерных диодов. 16 лазерных диодов установили так, чтобы ось излучения диодов была параллельна оптической оси телекамеры (см. рис. 1).

Производятся телевизионные измерения угла расположения лазерных пятен и затем вычисляются расстояния до объектов, как описано в [17].

Жестко установленная между ними телекамера фиксирует световые пятна на предметах. В этом случае угловая погрешность (σ_φ) — постоянна и не зависит от расстояния до объекта (d_{ob}).

Для определения дальности до объектов предложен новый метод программируемого управления коммутацией лазерных диодов в зависимости от типа решаемой задачи и способа сканирования сцены. При этом каждый раз минимизируется количество измеряемых световых пятен и сокращается время реакции системы на конкретную ситуацию.

Например, для задачи предотвращения столкновения схвата робота с препятствиями включаются периферийные диоды, создающие некоторую защитную сетку, работающую по принципу "усов" животного: при попадании препятствия в зону "усов" с какой-либо стороны сразу в поле зрения телекамеры регистрируются световые пятна с данного направления.

Для задачи ориентации схвата робота относительно плоскости рабочей сцены достаточно включить три диода, создающих три опорных точки на плоскости.

В случае сканирования формы произвольного объекта, подлежащего взятию роботом, можно включить "ребенку" диодов с одной стороны и провести ею с помощью робота над объектом на заданной высоте, при этом получим ряд сечений объекта линиями лучей диодов. Для более детального анализа формы части объекта можно включить локальный пучок близко расположенных диодов и получить точечный рисунок, конфигурация которого позволяет вычислить трехмерную форму зоны интереса объекта.

Процедура определения положения робота по входному изображению состоит из поиска и вычисления экранных координат реперов, реализованных на аппаратном уровне, их идентификации и расчета положения робота в системе координат телекамеры.

Основные вопросы рассматривались в данном проекте применительно к сборочным роботам с гибким управлением, работающим в условиях недетерминированной среды, а также — для манипуляторов с гибкими звеньями.

Выводы по применению стерео системы для целей измерения местоположения объекта были сделаны следующие:

1. На малых и средних дальностях погрешность измерений стерео методом приемлема для выполнения сборочных операций.

2. Для больших дальностей будет более эффективен метод осмотра моно-телевизионной системой с разных позиций. При этом возрастает базовое расстояние (d_b) и уменьшается угол φ , что приводит к значительному уменьшению погрешностей (δ). Однако, необходимо учесть влияние погрешности позиционирования телекамеры в двух точках. Также, нужно оптимально выбрать позиции для съемки.

Стереозрение используется для визуализации сцены человеку-оператору и автоматического управления манипулятором на коротких расстояниях до объекта.

Стерео-измерения расстояния и глубины объектов более точны на локальных, коротких расстояниях, но метод "рассматривания в движении" более информативен в глобальном, на больших расстояниях до позиций [16].

На концепции "рассматривания в движении" основаны некоторые новые исследования методов управления для навигации автономных роботов. Во многих исследованиях систем управления для гибких манипуляторов для задач сборочных роботов используют методику "глаз на руке".

Для методики "рассматривания в движении" есть возможность увеличить базовое расстояние (d_b) и уменьшить угол зрения (φ), поэтому точность измерения, по существу, возрастает.

При этом точность позиционирования телекамеры оказывает влияние на точность измерений, и поэтому необходимо делать интеллектуальный алгоритм управления движением роботов оптимальный для рассматривания.

Концепции наведения по изображению "глаза в руке" [17] в комбинации с методами "рассматривания в движении" [13] для автоматически функционирующих систем нашли свое отражение в новом Многофазном Методе.

Предложенный Многофазный Метод (МФМ) измерения пространственных координат является объектно-ориентированным и разработан, в частности, для сборочных роботов и легких манипуляторов (типа манипуляторов с гибкими звеньями).

Рассматривается задача измерения пространственных координат захватного устройства манипулятора относительно произвольно-ориентированных объектов сцены в процессе выполнения сборочных операций.

Концепция Многофазного Метода основана на представлении процесса "рассматривания в движении" как постоянного развития формы конфигурации пары: "глаз в руке" и объекта. Этот метод может использоваться как в 3-х мерном пространстве, так и в пространстве задачи. Движение в пространстве задачи или перемещение в пространстве координат — есть вариации процесса для ситуации задачи или для пространственно — временных ситуаций сцены [14, 18].

Для процесса сборки и измерений положения до объектов в пространстве можно выделить три основные задачи, решаемые с использованием МФМ:

Первая задача МФМ — достичь того, чтобы геометрическая форма движения "глаза в руке" была описана как структура элементарных движений на том же самом языке, что и геометрическое описание формы объекта.

Центральная задача МФМ состоит в том, чтобы каждая определенная ситуация (компоновка) объекта и движения была описана, как локальная "Фаза" структуры, и все "Фазы" были собраны в иерархическую систему глобальных Фазовых структур.

Третья задача МФМ состоит в том, чтобы определить (назвать) только «полезные» Фазы (например, для сборки), передающие максимальную оценку возможного качества и/или минимальный объем описания ситуации в Памяти системы.

В обычной жизни известно много простых примеров МФМ описаний, таких как:

- Фазы Луны (композиции: Солнце + Луна + Наблюдатель),
- Фазы лица (Лицо + Наблюдатель),
- "Точка зрения" при САД-проектировании (передняя сторона, верх, лево-право, и т.д.) — (Объект или Модель + наблюдатель или плоскость проекции),

- Фазы процесса сборки (деталь №1 + движение "1-2-3" руки (схвата) + деталь №2),
- Фазы процесса космической стыковки (см. рис. 2).

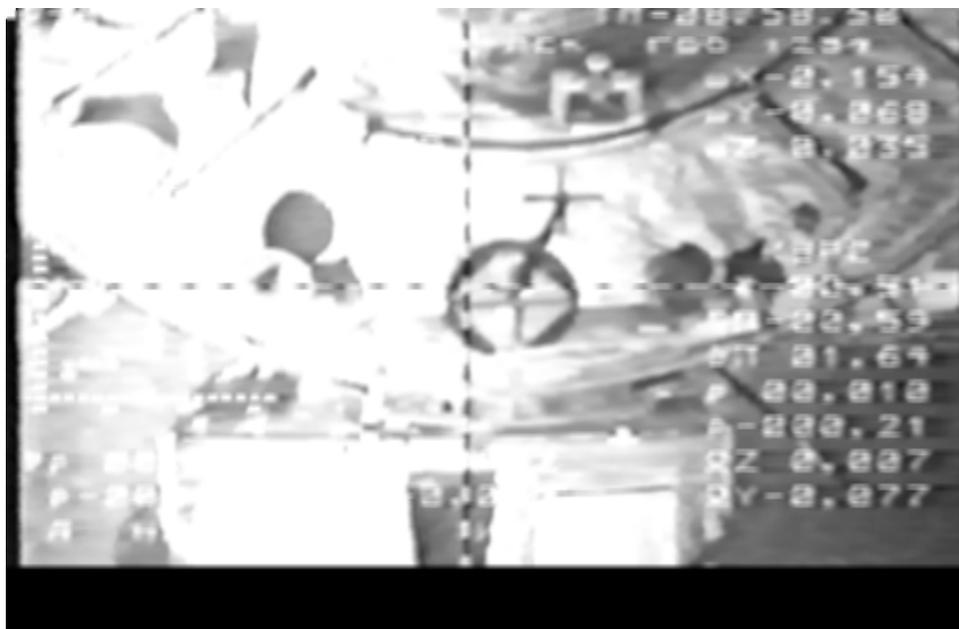
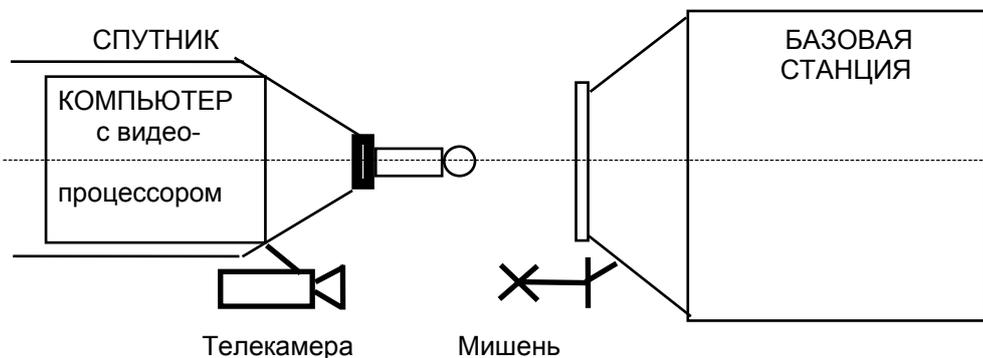


Рис. 2. Компьютерная телевизионная система для стыковки в космосе
 Компьютерная телевизионная система состоит из тех же самых модулей:
 - Космическая телевизионная камера, прикрепленная за бортом спутника,
 - Модуль цели (мишени) на базовой станции "МИР",
 - Специальный видеопроцессор и бортовой компьютер,
 - Состыкованное программное обеспечение бортового компьютера.

Фазы движений сборочного манипулятора должны быть ориентированы оптимально по положению для:

- распознавания объектов сцены,
- распознавания ориентации объекта-цели,
- измерения пространственных координат объекта,
- надежного захвата объекта и т.д.

Для решения измерительной задачи сборочного робота предлагаемый метод основывается на той идее, что для разных процедур, выполняемых по ходу процесса взятия детали, манипулятор во время движения совершает (проходит) разные "фазы" законченного цикла сборочной операции (оптимальные по разным критериям):

- а) осмотр сцены с группой объектов и поиск нужного объекта;
- б) выдвижение в позицию, максимально удобную для уверенного распознавания выбранного объекта с заданного ракурса;
- в) выдвижение в позицию, для максимально точного, быстрого и надежного измерения положения схвата относительно объекта;
- г) занятие позиции максимально удобной для надежного взятия с учетом ограничений на возможности схвата и фактической ориентации объекта и препятствий на сцене;
- д) выполнение движения "взятия" объекта;
- е) движение схвата с объектом среди препятствий сцены;
- ж) выход в зону сборки;
- з) выполнение процедуры совмещения объекта и сборочного узла изделия;
- и) механическая операция соединения объекта со сборочным узлом;
- к) контроль завершенности процесса сборки;
- л) выход манипулятора в исходное положение.

Эффективность процесса измерения пространственного положения объектов визуальной системой распознавания (СТЗ) в данном методе заключается в том, что на каждой стадии (фазе) сборочной операции движение манипулятора подчинено не столько задачам манипуляции (кинематики и динамике), сколько задачам точного и надежного распознавания и измерения объектов [3].

Например, для оценки глубины сцены и удаления объектов мы применяем пробное поперечное (перпендикулярно оси поля зрения) движение телекамерой с точным знанием вектора движения. При этом по известным методам измеряются высоты (толщины) объектов и их расположение по дальности более точно и достоверно, чем это достижимо для стереоскопической системы.

Основные причины высокой надежности и высокой точности МФМ процесса измерений состоят в следующем:

- неограничены размеры стерео-базовой линии по сравнению с размером базы при установке стерео-телевизионной системы в схвате робота;
- трехмерная конфигурация базовой линии может быть оптимизирована по точности;
- постоянное интегрирование измерений во многих точках в течение фазы перемещения уменьшает шумовую флуктуацию измерений;
- оптимизация пути с учетом формы сцен уменьшает влияние на точность измерений теней и бликов;
- возможна компенсация оптических искажений и использование некалиброванных телекамер в процессе "рассматривания в движении" [11, 19];
- процессы распознавания и измерений, проводятся параллельно во времени, поэтому, движения становятся информативнее ("интеллектуальнее"), защищены от ошибок и надежны.

Фрейм-ориентированное запоминание и доступ к информации о форме объекта, а также о форме движения в этой работе представлены Моделью Памяти Формы [3].

Полное описание процесса измерения визуальным наведением с использованием МФМ даст возможность достичь надежности и простоты решения сборочных задач на уровне, приближенном к возможностям человека.

3. Структура модели памяти формы

Для процесса сборки исследованы задачно-ориентированные, основанные на фреймовских структурах способы организации памяти конфигурации объекта и конфигурации движения.

В Модели Памяти Формы (МПФ) движение и объект хранятся одновременно с обычным описанием на естественном языке.

Хорошо известен процесс описания управления роботом некоторыми новыми концепциями:

- Мульти-агентная (МА) архитектура робота [20],
- Конечный автомат (FSM) [12],
- Язык обработки ситуаций CoRA [14],
- Петри-сетевые модели [21],
- Теле-сенсорное программирование (TSP) [22],
- другие применения фрейм-ориентированной модели [9].

Мульти Модельные Представления и Автоматическое Создание Мета — моделей используются для планирования и отображения траектории движений сборочных манипуляторов. Знания накапливаются фрагментами и используются в зависимости от задачи (или ситуации) также избирательно. Использование моделей предсказания на основе Запомненных Знаний позволяет избежать обычных потерь при использовании поисковых методов типа "проб и ошибок" во время принятия решений и выполнения действий.

Простое перемещение, генерация движений и сегментация траектории или глобального движения известны, например, в Теле-сенсорном программировании (TCP) [17, 22].

В данной работе исследуется новое предложение 3-х мерной фрейм-ориентированной структуры формы объектов и формы движений. Основное отличие МПФ языка от общего описания структуры состоит в естественном интегрировании количественных (метрических) и качественных особенностей формы объекта (движения) [3].

Надежность объектно-ориентированного процесса распознавания обеспечивается постоянным взаимодействием (основанным на общей концепции МПФ):

а) двух информационных потоков в пространстве координат: распознавания (синтеза) зрительных образов и расшифровки (анализа) предиктивной модели задачи в режиме реального времени,

б) двух информационных потоков в пространстве задачи: синтеза модели ситуации на основе сенсорной информации и анализа задачи (детализации и расшифровки) в пространстве задачи.

Преимущества визуального слежения, направляющего процесс сборки, основанного на МПФ, по нашему мнению, состоят в следующем:

- система фреймов МПФ описывает форму (композицию) ситуации в целом;
- форма системы фреймов МПФ в целом, в свою очередь, может быть описана на том же языке МПФ подобно "генетической молекуле" агента ситуации;
- модель агента ситуации обеспечивает хранение формы движения для различных функций, таких как: поиск, наведение, подтверждение (проверка), изменение глубины и т.д.;
- язык формы движений на языке МПФ совпадает с описаниями формы объектов сцены;

- МФП используется не столько для регистрации последнего местоположения объекта, но и для предсказания и моделирования будущего местоположения объектов сцены [22].

5. Конструкция оптико-телевизионной системы

Оптико-телевизионная система (ОТС) осуществляет управление, в режиме реального времени, отслеживая движение головы, рук и инструментов, и делая эти данные доступными для управления различными динамическими объектами, а также, пространственным движением компьютерных моделей.

По сравнению с известными устройствами ввода, ОТС предназначена для управления по 6-ти степеням свободы (X, Y, Z, Рыскание, Тангаж и Крен) объекта в реальном времени (см. рис. 3, 4).

ОТС позволяет оператору естественно двигать головой и управлять объектом по 6-ти координатам. Еще, проще и естественнее использовать руку, свободно перемещающуюся в пространстве.

В структуру системы "ОТС" входят:

- локационное устройство,
- реперное устройство на голове или в руках,
- плата сигнального процессора,
- программное обеспечение для IBM PC.

Особенностями применения являются (см. пример на рис. 4):

- одновременное управление по трем направлениям и трем углам поворота одним движением головы и/или руки;
- управление в режиме реального времени реальными объектами;
- использование стандартного IBM PC;
- управление движением объемных изображений в режиме реального времени;
- естественность и простота управления;
- работа в среде Windows и 3D-CAD.

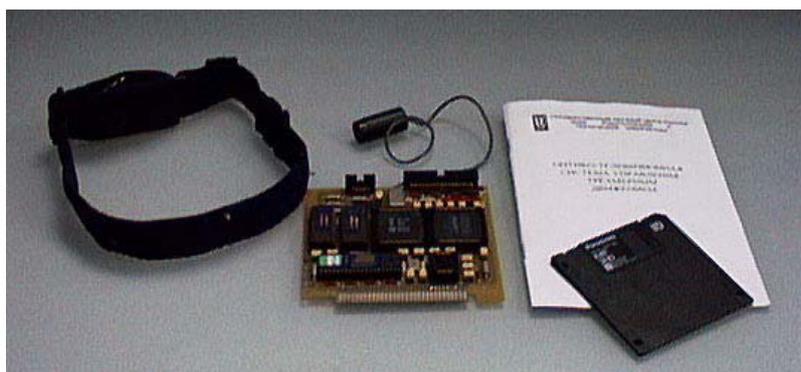


Рис. 3. ОТС

Технические Степени свободы: 6 (Координат и Ориентаций).
Диапазон дальностей: до 2 метров (4 метра под заказ).
Угловой диапазон: ± 90 град. по Азимуту, ± 45 град. по углу места и крену.
Статическая точность позиционирования: 0.07" (1.8 мм) среднеквадратичное значение.
Статическая точность ориентации: 0.5 град. среднеквадратичное значение.
Статическая разрешающая способность по координатам: 0.02" (0.5 мм) среднеквадратичное значение.

Статическая разрешающая способность по ориентации: 0.1 градуса среднеквадратичное значение.

Период обновления: до 100 Гц.

Выходные сигналы: X, Y, Z координаты позиции и 3 угла ориентации.

Интерфейс: PCI-шина и программный формат Windows.

Физические размеры: — Датчик: 25 мм x 25 мм x 20 мм,
— Маркерный модуль: не более 140 мм x 40 мм x 20 мм,
— PCI плата: стандарт 1/2 длины платы.

Мощность: Использует стандарт PCI шины персонального компьютера.

Среда: Металлические объекты и паразитные магнитные поля в рабочем объеме не будут ухудшать эксплуатационные показатели.

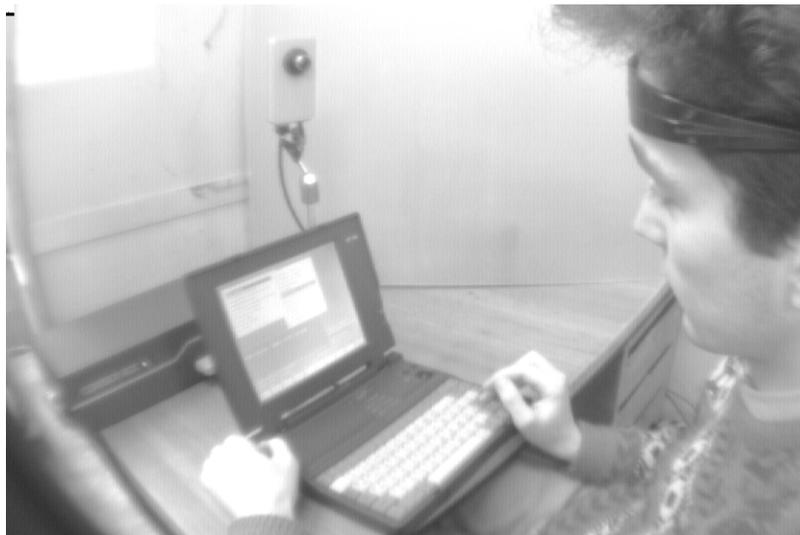


Рис. 4. ОТС с маркерным устройством на голове

Для выполнения обработки в режиме реального времени используется, перепрограммируемый "на-лету" DSP видеопроцессор [4, 5].

Экспериментальные исследования динамических параметров и точностных оценок системы ОТС для приложений в условиях реального времени, включают следующее:

- анализ и обработку данных стендовых исследований статической точности для варианта с двумя телевизионными камерами (приложение 1);
- исследования на компьютерной модели влияния компоновки фазового состояния системы "подвижный объект — телекамеры" на погрешность измерений и допустимые зоны перемещений объекта относительно телекамер для заданной точности измерений (приложение 2);
- эксперименты по оценке реальной погрешности измерений, вносимых аппаратурой видеопроцессора ОТС для различных вариантов исполнения при работе по реальным точечным сигналам и имитатору видеосигнала;
- работа по объектам различной формы с использованием системы распознавания и вычисления координат центров тяжести и ориентации (приложение 2).

6. Литература

- [1] *Бурдыгин А. И., Буняков В. А., Колесник А. М., Нечаев А. И., Чернакова С. Э.* Компьютерная телевизионная система измерения параметров взаимного движения космических аппаратов и управления объектами в реальном времени // Труды Международной

- школы-семинара им. А. Петрова «Адаптивные роботы и GSLT». — СПб, 7–10 июля 1998г.
- [2] Бурдыгин А. И., Буняков В. А., Колесник А. М., Нечаев А. И., Чернакова С. Э. Алгоритм автоматического наведения автономного робота // Материалы X Научно-технической Конференции "Экстремальная Робототехника". — СПб, 1999г.
- [3] Кулаков Ф. М., Нечаев А. И., Чернакова С. Э. Обучение робота методом показа с использованием "очувствленной" перчатки // Первая Международная Конференция по Мехатронике и Робототехнике. — СПб, 29 мая — 2 июня, 2000г.
- [4] Бурдыгин А. И., Буняков В. А. Исследование самоорганизующейся СТЗ для распознавания символов // XI Научно-техническая Конференция "Экстремальная робототехника". — СПб, Апрель 2000г.
- [5] Бурдыгин А. И., Буняков В. А. Самоорганизующаяся ячейка для СТЗ // X Научно-техническая Конференция "Экстремальная Робототехника". — СПб, 1999г.
- [6] Бурдыгин А. И., Буняков В. А., Колесник А. М., Нечаев А. И., Хлебникова Е. С., Чернакова С. Э. Модель системы технического зрения, управляемой фрейм-структурированным потоком задач // Конференция по фундаментальным исследованиям. — СПб: СПбГТУ, 1998г.
- [7] Бурдыгин А. И., Буняков В. А., Колесник А. М., Чернакова С. Э. Оптико-телевизионная система целеуказания // Труды Международной школы-семинара им. А. Петрова «Адаптивные роботы и GSLT». — СПб, 7–10 июля 1998г.
- [8] Коллектив авторов. Ответственный редактор, кандидат психологических наук, Н. Н. Корж. Исследование памяти. — М.: Наука, 1990.
- [9] М. Минский. Фреймы для представления знаний: — Пер. с англ. — М.: Энергия, 1979. — 152 с., с ил.
- [10] G. Hirzinger, B. Brunner, S. Knoch, R. Koeppel, M. Schedl. Towards a new Robot Generation. — The 8th International Symposium, Schohan, Japan, 4–7 Oct. 1997.
- [11] K. Vollmann, Minh Chinh Nguyen. Manipulator control by calibration-free stereo vision. — SPIE's International Conference on Intelligent Robots and Computer Vision XV, Boston, Nov. 1996.
- [12] A. Mori, K. Hiramatsu, F. Naya, N. Osato. A Robot-Controlling Agent Description with Finite State Machines. — NTT Communication Science Laboratories, Hikaridai, Seika-cho, Soura-cugun, Kyoto, Japan.
- [13] C. Tavanti, J. Devars. Vision and teleoperation for outdoor rapid mobile robotics. — Mechatronics'98, Kitokiusu.
- [14] K. Peters, S. Strippgen, J. -T. Milde. CoRA — An Instructable robot. — Mechatronics'98. Kito-kiusu.
- [15] F. Prieto, R. Lepage, P. Boulanger, T. Redarce. Inspection of 3D parts using high accuracy range data // Machine Vision Applications in Industrial Inspection VIII, Kenneth W. Tobin, Jr., editor, Proceedings of SPIE.
- [16] Minh — Chinh Nguyen, V. Graefe. Visual Recognition of Objects for Manipulating by Calibration-free Robots // Machine Vision Applications in Industrial Inspection VIII, Kenneth W. Tobin, Jr., Editor, Proceedings of SPIE.
- [17] G. Hirzinger, J. Butterfafl, M. Fischer, M. Grebenstein, M. Hiihnle, H. Liu, I. Schaefer, N. Sporer. A Mechatronics Approach to the design of light-weight arms and multifingered hands. — International Conference on Robotics and Automation San Francisco, CA. April 2000.
- [18] B. Brunner, J. Heindl, G. Hirzinger, K. Landzettel. Telerobotics Systems using Virtual Environment Display with Visual and Display Functions. — Institute for Robotics and System Dynamics, Oberpfaffenhofen, Germany.
- [19] Minh — Chinh Nguyen. Self-learning, calibration-free, vision-guided robots. — SPIE's International Technical Group Newsletter. Electronic Imaging, November 1999.
- [20] P. Levi, M. Becht, R. Lafrenz, M. Muscholl. COMROS — A Multi-Agent Robot Architecture. Applied computer Science — Image Understanding, — Institute of Parallel and Distributed High-Performance System (IPVR), University of Stuttgart, Germany.
- [21] R. D. Hale, Rokonzaman, R. G. Gosine. Control of mobile robots in unstructured environments using discrete event modeling. C-CORE. — Canada. SPIE Conference on Mobile Robots XIV, Boston, Massachusetts, September 1999.

[22] G. Hirzinger. Multisensory shared autonomy and tele-sensor programming — Key issues in space robotics. — Robotics and Autonomous Systems. 11.1993.

Приложение 1

Экспериментальные результаты точностных оценок "ОТС"

Таблица 1. Ошибки ОТС по углу, град. \ мин. (азимут (Az), угол места (El), координаты (X, Y, Z))

		Азимут Az (град.)												
		+60	+50	+40	+30	+20	+10	Az=0	-10	-20	-30	-40	-50	-60
Угол места El (град.)	50						-100.06 \ 25.25	-101.43 \ -6.03	-101.50 \ 14.04					
	40			6.35 \ -2.31	2.56 \ -1.29	0.36 \ -0.29	0.13 \ -0.16	-0.08 \ 0.12	-0.06 \ 0.52	0.03 \ 1.33	0.12 \ 2.15			
	30			1.34 \ -1.28	0.59 \ -1.11	0.35 \ -0.40	0.18 \ -0.18	-0.10 \ 0.09	-0.27 \ 0.29	-0.33 \ 1.07	-0.17 \ 1.29	0.22 \ 1.55	4.48 \ 3.01	
	20		2.36 \ -1.30	1.45 \ -1.16	1.08 \ -0.55	0.56 \ -0.38	0.15 \ -0.16	-0.28 \ -0.10	-0.49 \ 0.06	-1.07 \ 0.37	-0.47 \ 0.47	-0.12 \ 1.02	0.25 \ -1.25	1.19 \ 0.00
	10	3.17 \ -0.52	2.40 \ -0.55	1.46 \ -1.07	1.26 \ -0.58	1.01 \ -0.28	0.16 \ -0.20	-0.14 \ -0.07	-1.03 \ 0.09	-1.22 \ 0.17	-0.53 \ 0.23	-0.02 \ 0.33	0.34 \ 0.41	1.24 \ 1.00
	El=	3.19 \ -0.48	2.56 \ -0.37	1.55 \ -0.44	1.25 \ -0.56	1.18 \ -0.37	0.56 \ -0.17	-0.02 \ 0.01	-1.11 \ 0.17	-0.49 \ 0.23	-0.02 \ 0.17	0.46 \ 0.23	1.10 \ 0.53	1.40 \ 0.38
	-10	3.52 \ 0.25	2.01 \ -0.05	1.48 \ -0.39	1.43 \ -0.52	1.35 \ -1.01	1.31 \ -0.33	0.13 \ -0.05	-0.37 \ 0.11	-0.23 \ 0.40	0.59 \ 0.30	1.26 \ 0.30	2.07 \ 1.25	2.35 \ 0.16
	-15	2.42 \ 0.46	1.49 \ 0.2	0.58 \ -0.04	1.36 \ -0.44	1.38 \ -0.55	1.40 \ -0.42	0.40 \ 0.07	-0.23 \ 0.25	-0.16 \ 0.42	1.01 \ 0.35	2.08 \ 0.31	2.15 \ 1.18	2.48 \ 0.01

Таблица 2. Ошибки ОТС по углу, в градусах (азимут (Az), угол места (El), координаты (X, Y, Z))

El/Az	-45.00	-30.00	-15.00	0.00	15.00	30.00	45.00
60.00	0.37	0.33	—	0.09	0.29	0.09	—
	0.07	0.45	0.16	0.48	0.23	0.07	1.17
	0.36	0.41	0.59	0.06	0.14	0.08	—
	-4.43	-6.00	0.20	-6.84	-5.73	-3.11	0.05
	2.17	2.20	-6.71	2.16	2.13	2.15	—
	0.11	0.68	2.20	—	0.80	0.60	1.59
			0.20	0.65			-1.89
							2.35
							1.61
45.00	—	0.07	0.01	—	—	—	—
	0.04	0.08	—	0.15	0.13	0.14	0.21
	—	0.12	0.12	—	—	0.23	—
	0.54	-3.40	—	0.35	0.42	—	0.38
	0.08	2.34	0.13	—	—	0.17	—
	1.86	—	-1.16	0.41	0.48	-5.34	0.49
	1.17	0.15	1.81	-0.24	0.79	1.89	-0.86
	—	—	0.19	1.39	1.43	—	1.50
2.30			1.32	2.03	0.30	2.56	
30.00	—	0.11	0.05	0.19	—	—	—
	0.03	0.11	—	—	0.14	0.19	-
	—	0.17	0.20	0.14	—	—	-
	0.43	-2.80	—	—	0.03	0.09	-
	0.15	1.86	0.03	0.05	—	—	-
	1.34	—	0.40	-0.35	0.09	0.29	-
	0.70	0.86	0.99	1.05	-1.84	-2.97	-
	—	—	—	—	1.35	0.92	-
2.24		0.57	0.47	0.84	1.90	-	
15.00	0.01	0.19	—	—	—	0.03	0.07
	0.14	—	0.06	0.03	0.01	—	0.05
	0.19	0.20	—	—	—	0.11	—
	-1.53	0.13	0.10	0.04	0.12	—	0.20
	1.91	-2.34	—	—	—	0.15	-1.30
	—	—	0.01	0.04	0.10	-1.07	1.36
	1.13	0.26	0.53	0.06	-0.66	0.32	1.03
	—	—	0.64	0.76	0.25	1.35	—
	2.70	—	0.18	1.00			
0.00	—	—	—	0.00	0.14	0.10	0.08
	0.10	0.01	0.09	—	—	—	—

	— 0.07 0.20 - 0.70 0.17 — 1.95	— 0.18 0.17 - 0.57 — 0.90 — 2.08	— 0.28 0.10 0.95 — 1.41 — 0.79	0.02 0.00 - 0.01 — 0.18 0.02	0.09 0.00 0.33 — 0.38 0.01	0.13 — 0.10 - 0.14 — 0.57 1.13	0.26 — 0.22 - 1.61 — 1.19 2.46
-15.00	— 0.09 — 0.25 0.28 - 1.78 — 2.52 — 3.13	— 0.02 — 0.16 0.34 - 2.59 — 2.74 — 3.36	— 0.02 0.00 0.23 - 0.64 — 1.25 — 1.76 — 0.61	0.08 — 0.03 0.05 0.51 — 1.09 — 0.61	0.11 — 0.31 0.02 1.15 — 2.53 0.13	0.14 0.05 — 0.01 - 0.04 — 0.52 0.70	0.05 0.00 — 0.30 - 3.88 — 1.36 3.23
-30.00	- - - - -	— 0.27 — 0.11 0.33 - 0.30 — 2.35 — 1.30	— 0.12 — 0.15 0.24 - 0.37 — 3.03 — 1.09	0.09 1.24 0.17 - 0.22 3.21 — 1.22	0.15 0.31 0.10 0.28 0.24 — 0.55	0.33 0.15 0.15 2.73 1.04 — 1.55	- - - - -