

На правах рукописи

ВАСИЛЬЕВ Иван Анатольевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ
МНОГОЦЕЛЕВОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ
СИСТЕМОЙ**

Специальность 05.02.05 – Роботы,
мехатроника и робототехнические
системы

Автореферат диссертации на
соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2008

Работа выполнена в Центральном научно-исследовательском и опытно-конструкторском институте Робототехники и Технической кибернетики (ЦНИИ РТК).

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Тимофеев А.Н.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Маленков М.И.

доктор технических наук, профессор Заболоцкий В.П.

Ведущая организация: Федеральное Государственное Унитарное Предприятие "Центральный научно-исследовательский институт машиностроения" (ФГУП ЦНИИМАШ)

Защита состоится 27 января 2009 г в 16 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.229.12 при ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный Политехнический университет" по адресу: С-Петербург, Политехническая ул., 29, 1-й учебный корпус, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан 18 декабря 2008 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.12

Евграфов А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время в робототехнике одно из наиболее актуальных и перспективных направлений – разработка робототехнических систем (РТС), предназначенных для обслуживания космических объектов, в первую очередь роботизированных комплексов (РТК) для обслуживания крупногабаритных орбитальных станций. Начиная с семидесятых годов работы по созданию РТС космического назначения в СССР, а затем в России проводились в таких организациях Москвы и Ленинграда (Санкт-Петербурга), как МВТУ им. Баумана, ЦНИИ РТК, ИПМ им. Келдыша, ВНИИТРАНСМАШ, ЦНИИМАШ и др.

В настоящее время, в связи с увеличением работ, производимых на орбите Земли (в основном, на МКС) и, в перспективе, при планировании полетов на Луну и Марс, разрабатываются робототехнические системы, уменьшающие физический труд космонавтов. В 1999-2004 годы в ЦНИИ РТК была создана манипуляционная РТС "*Dores*", в научно-исследовательских разработках которой и в проектировании программного обеспечения принимал участие автор данной диссертации.

В то же время, по причине малого практического опыта использования космических РТС, были недостаточно проработаны технологические операции, выполняемые роботом при обслуживании космических аппаратов и перемещении полезных грузов.

Также, были недостаточно разработаны методы «обслуживания» самой РТС: планирование движений, построения траекторий (и связанных с ними кинематических задач), калибровки сенсорики и структуризации программного обеспечения (ПО).

На основе вышеперечисленного **поставлены цели** настоящей диссертации: разработка научных основ проектирования систем управления многоцелевых РТС космического назначения, предназначенных для выполнения на борту МКС манипуляционных задач в режимах автоматического и супервизорного управления со свойствами адаптивности и искусственного интеллекта.

Для достижения формулированной цели в рамках настоящей работы были решены следующие **основные задачи**:

- разработаны принципы планирования движений орбитального манипулятора, опирающихся на базовый класс элементарных операций;
- разработан эффективный способ создания унифицированного программного обеспечения РТС космического назначения;
- сформулирована задача управления на уровне установления целей и выработки заданий по поиску и манипулированию объектами с помощью системы технического зрения.

Основные положения, выносимые на защиту:

- методы построения сложных и комбинированных движений космического орбитального робота при выполнении типовых технологических и вспомогательных операций;
- методы автоматизированного формирования аналитического решения обратных кинематических задач для ангулярных шестизвенных манипуляторов;
- принцип построения унифицированного программного обеспечения для управления космическими или орбитальными роботами;
- реализация указанных принципов и методов в программном обеспечении космической РТС.

Методы исследований. При построении математических моделей и при решении задач геометрии, кинематики и динамики манипуляторов использовались методы векторной алгебры, теоретической и аналитической механики, теории механизмов. При обосновании предлагаемого метода составления программ движения для многоцелевых космических РТС используются методы декомпозиции, анализа и синтеза поставленных задач. При проведении на компьютере численных расчетов использовались универсальные программы *Mathcad* и *Mathlab*, а для выполнения сложных аналитических преобразований система *Mathematica*. Для моделирования движений самих манипуляторов использовался пакет моделирования *ADAMS*.

В качестве практических систем программирования использовались *Delphi* и *Keil*.

Научная новизна диссертации заключается в:

- разработке общих методов автоматизированного формирования аналитического решения обратных задач позиционирования для шестизвенных ангулярных манипуляторов;
- разработке способа оценки максимальных значений моментов в шарнирах при типовых движениях орбитального или космического манипулятора, который позволяет унифицировано и эффективно проводить необходимые вычисления;
- формулировке и обосновании способов формирования программных траекторий движения космического манипулятора;
- предложении и обосновании нового подхода к калибровке СТЗ роботов.

Апробация работы и публикации. Основные положения работы докладывались на международных научно-технических конференциях "Экстремальная робототехника" в ЦНИИ РТК, а также на международных конференциях «Интеллектуальные и многопроцессорные системы - 2003» (Геленджик, Россия), «MECHROB-2004» (Аахен, Германия) и «ISIE'2005» (Дубровник, Хорватия). Основное содержание диссертации отражено в восьми публикациях, в том числе одна – в журнале из списка ВАК.

Практическая ценность работы заключается в создании и реализации унифицированного подхода к решению обратных кинематических задач, к калибровкам систем технического зрения и к структуризации программного обеспечения для управления манипуляторами.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем диссертации 152 страницы, в тексте имеется 37 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследования, а также основные положения, выносимые на защиту, дается краткий обзор диссертации по главам.

В первой главе дается краткий анализ современного состояния космической робототехники. На двух уровнях группируются и классифицируются типовые задачи, которые должен решать проектируемый манипуляционный робот на космической станции.

1. Сборочные работы включают: монтаж и сборка конструкций и их фрагментов; замена и ремонт модульных блоков отказавшего оборудования; сборка-разборка объекта по программе сборки; ремонт, обслуживание и обеспечение правильности функционирования летающих объектов; перемещение предметов на орбите к летающему объекту и его обзор; определение выхода из строя устройства на объекте; сближение и захват летающего объекта; прекращение аварийного вращения объекта; обслуживание, заправка, ремонт; установка, укладка или запуск.

2. Специальные задачи технологии материалов включают: изготовление монокристаллов и электронных микросхем; сборку микросхем в вакууме; выращивание кристаллов; получение сплавов; манипулирование опасными для здоровья веществами; производство особых фармацевтических препаратов.

3. Обслуживание грузового отсека, в том числе: помещенных в нем спутников и средств для перемещения космонавтов в открытом космосе; смена блоков и приборов, кассет регистрирующих приборов; загрузка в бункеры; замена отдельных узлов; смазка узлов; перезарядка и дозаправка топливом спутников или самого корабля; исправление формы и замена поврежденных антенн; обработка поверхностей изделий; различного рода очистка, уборка; механообработка: резка, сверление, шлифовка; установка и затягивание винтов, болтов и гаек, клепка; осмотр рабочей зоны и доступного для обзора окружающего пространства; инспекция и контроль; диагностика и анализ неисправностей

элементов отсека; калибровка средств измерений и контроля; техническое обслуживание и ремонт роботом самого себя.

4. Элементарные операции сопряжения: вставка штепселей в отверстия; соединение разъемов электрических контактов; закручивание винтов; навешивание дверей на петли; стыковка-отстыковка специальных соединений трубопроводных магистралей и кабелей таких объектов, как радиаторы, гироскопические системы, солнечные батареи, люки шлюзовых камер, и т.д.; стыковка с орбитальным транспортным средством; захватывание и удержание объекта универсальным захватом; захватывание и удержание подвижного объекта при относительном движении; захватывание и удержание подвижным роботом неподвижного или подвижного объекта.

Перечисленные и многие другие операции могут быть представлены как последовательность элементарных технологических операций - *фреймов* действий роботов, которые являются основой для построения соответствующих модулей программного обеспечения - *технологических операций (ТОП)*.

Вторая глава посвящена построению математической модели и расчетному исследованию конкретного космического манипулятора.

Робот «*Dores*», спроектирован и изготовлен в экспериментальном экземпляре в ЦНИИ РТК в 1999-2004 годах. Его манипулятор представляет собой шестизвенный механизм с разомкнутой кинематической цепью, с тремя переносными степенями подвижности и с тремя ориентирующими. Он предназначен для частичной замены космонавтов во внекорабельной деятельности. На рис. 1 представлен общий вид робота, и на рис. 2 его расчетная схема (кинематика и системы координат). Все кинематические пары - вращательные (плоские шарниры).

Для задания систем координат звеньев, их параметров и преобразований систем координат, применяется формализм Денавита-Хартенберга, на основе которого производится построение матричного уравнения, связывающего углы в шарнирах с требуемыми координатами рабочего органа:

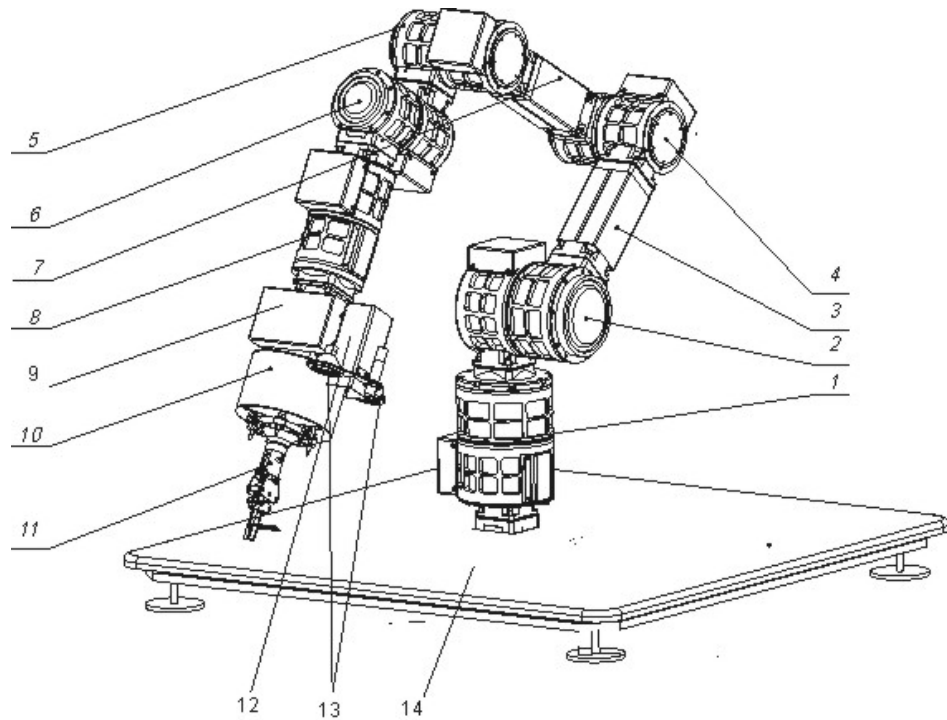
$$A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 = P, \quad (1)$$

где A_i – матрица (размерности 4x4) перехода от $i+1$ -ой системы координат к i -ой;

P – матрица перехода из целевого положения последнего звена (захватного устройства) в базовую систему координат.

Известен ряд свойств соотношений (1), вызванных спецификой кинематических схем манипуляторов: уравнения, полученные путем приравнивания трех верхних элементов самого правого столбца в матричном уравнении (1), независимы, так как они являются декартовыми координатами целевого положения. Также заметим, что матрицы 3x3, полученные вычеркиванием правого столбца и нижней строки из матриц A_i ,

входящих в уравнение (1), являются ортогональными, так как эта матрица является матрицей направляющих косинусов целевого положения.



1 - шарнир рыскания плеча; 2 - шарнир тангажа плеча; 3 - плечевое звено; 4 - шарнир локтя; 5 - шарнир тангажа кисти; 6 - шарнир рыскания кисти; 7 - звено локтя; 8 - шарнир крена кисти; 9 - контроллер захватного устройства; 10 - специализированное захватное устройство; 11 - универсальное захватное устройство; 12 - телевизионная камера; 13 - прожектора; 14 - плита основания.

Рисунок 1 – Общий вид манипулятора *Dores*

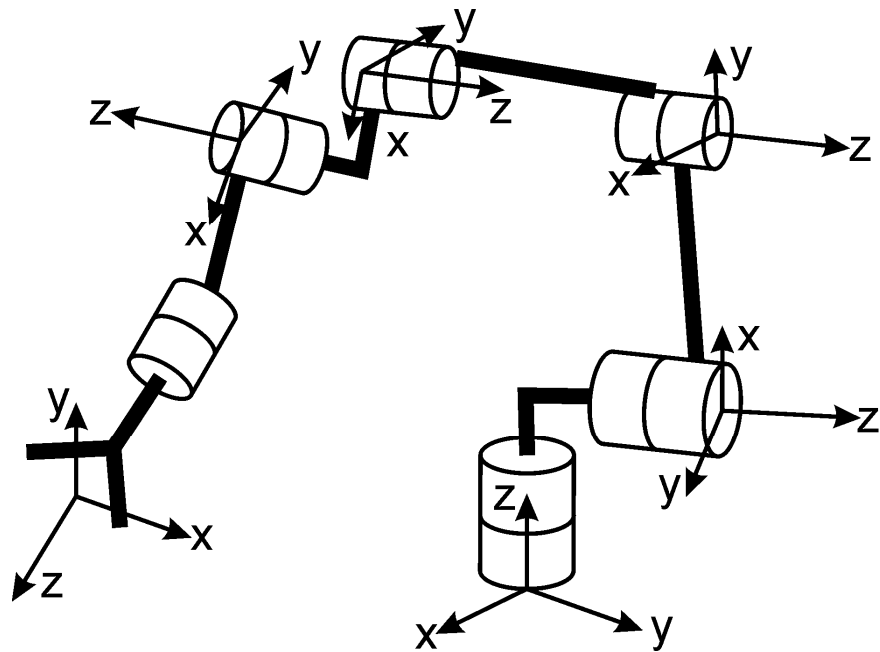


Рисунок 2 – Кинематическая схема и системы координат манипулятора «*Dores*»

Этот способ позволяет не только четко формализовать задание систем координат, но и единообразно задавать матрицы преобразования из системы координат, связанной с каждым предыдущим звеном, в систему координат последующего звена. Такой метод используется для описания геометрии и кинематики манипуляционного робота (прямая и обратная задачи кинематики) и применяется при составлении динамических уравнений, а затем для решения прямой и обратной задач динамики. Практическая польза метода заключается в том, что процедура составления формул для решения прямых кинематической и динамической задач полностью формализована, и возможен высокий уровень автоматизации составления общей математической модели.

В диссертации рассмотрены два метода решения обратной кинематической задачи:

1) разработанный автором метод автоматизированного формирования аналитического решения обратной кинематической задачи для ангулярного шестизвенного манипулятора;

2) классический геометрический метод решения обратной кинематической задачи.

Для автоматизированного формирования аналитического решения обратной задачи геометрии и кинематики для ангулярных космических орбитальных роботов использовалась система символьных вычислений *Mathematica 5.0*.

Метод формирования аналитического решения состоит в последовательном выполнении следующих действий в среде системы *Mathematica*:

1. Задание кинематической схемы. Здесь задаются те линейные параметры (длина и смещение), которые для данного манипулятора нулевые; и те угловые параметры (поворот и фаза), которые кратны $\pi/2$;

2. Производим перемножения матриц (1) с учетом кинематической схемы, заданной в п. 1, и упрощаем полученные выражения;

3. Параметризуем углами Эйлера, заменяем косинусы и синусы тангенсами половинных углов и упрощаем;

4. Приравниваем диагональные элементы нулю и решаем относительно разных углов. Замечаем, что есть неположительные выражения под радикалом вида:

$$\sqrt{-a^2}, \quad (2)$$

где a – некоторое нелинейное выражение.

5. Решаем, приравнивая выражение под радикалом нулю – чтобы не было мнимости;

6. В уравнениях столбца прямоугольных координат производим замену на тангенсы половинных углов, упрощаем и составляем систему уравнений. Замечаем, что два уравнения из этих имеют удобный для решения вид:

$$\begin{cases} \sin(q_i) + a \sin(q_j) = c \\ \cos(q_i) + a \cos(q_j) = b \end{cases} \quad (3)$$

где a, b, c – константы, полученные в преобразованиях;

Решаем эту систему и упрощаем результат;

7. Производим преобразование от тангенсов – к синусам и косинусам двойных углов.

В качестве примера того, что вручную не всегда удастся выполнить требуемые преобразования по причине чрезмерной громоздкости выражений, на рисунке 3 приведено одно из множества промежуточных выражений, получающихся при выводе аналитического решения.

$$\begin{aligned} & \left(-4 \cos[\psi] \sin[\theta] t_5 - 8 \sin[\theta] \sin[\psi] t_1 t_5 + 4 \cos[\psi] \sin[\theta] t_1^2 t_5 - 4 \cos[\psi] \sin[\theta] t_5 t_{23}^2 - 8 \sin[\theta] \sin[\psi] t_1 t_5 t_{23}^2 + 4 \cos[\psi] \sin[\theta] t_1^2 t_5 t_{23}^2 - \sqrt{\left((4 \cos[\psi] \sin[\theta] t_5 + 8 \sin[\theta] \sin[\psi] t_1 t_5 - 4 \cos[\psi] \sin[\theta] t_1^2 t_5 + 4 \cos[\psi] \sin[\theta] t_5 t_{23}^2 + 8 \sin[\theta] \sin[\psi] t_1 t_5 t_{23}^2 - 4 \cos[\psi] \sin[\theta] t_1^2 t_5 t_{23}^2) \right)^2} - \right. \\ & 4 \left(-1 + \cos[\theta] - t_1^2 + \cos[\theta] t_1^2 - 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_5 + 4 \cos[\psi] \sin[\theta] t_1 t_5 + 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_1^2 t_5 - t_5^2 - \right. \\ & \cos[\theta] t_5^2 - t_1^2 t_5^2 - \cos[\theta] t_1^2 t_5^2 - 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_{23} + 4 \cos[\psi] \sin[\theta] t_1 t_{23} + 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_1^2 t_{23} - \\ & 4 \cos[\theta] t_5 t_{23} - 4 \cos[\theta] t_1^2 t_5 t_{23} + 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_5^2 t_{23} - 4 \cos[\psi] \sin[\theta] t_1 t_5^2 t_{23} - \\ & 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_1^2 t_5^2 t_{23} - t_{23}^2 - \cos[\theta] t_{23}^2 - t_1^2 t_{23}^2 - \cos[\theta] t_1^2 t_{23}^2 + 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_5 t_{23}^2 - 4 \cos[\psi] \sin[\theta] \\ & \left. \sin[\theta] t_1 t_5 t_{23}^2 - 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_1^2 t_5 t_{23}^2 - t_5^2 t_{23}^2 + \cos[\theta] t_5^2 t_{23}^2 - t_1^2 t_5^2 t_{23}^2 + \cos[\theta] t_1^2 t_5^2 t_{23}^2 \right) \\ & \left. \right) \left(-1 + \cos[\theta] - t_1^2 + \cos[\theta] t_1^2 + 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_5 - 4 \cos[\psi] \sin[\theta] t_1 t_5 - 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_1^2 t_5 - t_5^2 - \right. \\ & \cos[\theta] t_5^2 - t_1^2 t_5^2 - \cos[\theta] t_1^2 t_5^2 - 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_{23} + 4 \cos[\psi] \sin[\theta] t_1 t_{23} + 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_1^2 t_{23} + \\ & 4 \cos[\theta] t_5 t_{23} + 4 \cos[\theta] t_1^2 t_5 t_{23} + 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_5^2 t_{23} - 4 \cos[\psi] \sin[\theta] t_1 t_5^2 t_{23} - \\ & 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_1^2 t_5^2 t_{23} - t_{23}^2 - \cos[\theta] t_{23}^2 - t_1^2 t_{23}^2 - \cos[\theta] t_1^2 t_{23}^2 - 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_5 t_{23}^2 + 4 \cos[\psi] \sin[\theta] \\ & \left. \sin[\theta] t_1 t_5 t_{23}^2 + 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_1^2 t_5 t_{23}^2 - t_5^2 t_{23}^2 + \cos[\theta] t_5^2 t_{23}^2 - t_1^2 t_5^2 t_{23}^2 + \cos[\theta] t_1^2 t_5^2 t_{23}^2 \right) \Big) / \\ & \left(2 \left(-1 + \cos[\theta] - t_1^2 + \cos[\theta] t_1^2 - 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_5 + 4 \cos[\psi] \sin[\theta] t_1 t_5 + 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_1^2 t_5 - \right. \right. \\ & t_5^2 - \cos[\theta] t_5^2 - t_1^2 t_5^2 - \cos[\theta] t_1^2 t_5^2 - 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_{23} + 4 \cos[\psi] \sin[\theta] t_1 t_{23} + \\ & 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_1^2 t_{23} - 4 \cos[\theta] t_5 t_{23} - 4 \cos[\theta] t_1^2 t_5 t_{23} + 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_5^2 t_{23} - \\ & 4 \cos[\psi] \sin[\theta] t_1 t_5^2 t_{23} - 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_1^2 t_5^2 t_{23} - t_{23}^2 - \cos[\theta] t_{23}^2 - \\ & t_1^2 t_{23}^2 - \cos[\theta] t_1^2 t_{23}^2 + 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_5 t_{23}^2 - 4 \cos[\psi] \sin[\theta] t_1 t_5 t_{23}^2 - \\ & \left. \left. 2 \sin[\theta] \sin[\psi] t_1^2 t_5 t_{23}^2 - t_5^2 t_{23}^2 + \cos[\theta] t_5^2 t_{23}^2 - t_1^2 t_5^2 t_{23}^2 + \cos[\theta] t_1^2 t_5^2 t_{23}^2 \right) \right) \end{aligned}$$

Рисунок 3 – Пример промежуточного выражения

Для примера приведем решение для первого угла:

$$t_1 = \frac{-p_1 + S_\psi S_\psi d_6 \pm \sqrt{p_1^2 + p_2^2 - (d_2 + d_3)^2 + S_\psi d_6 (2p_2 C_\psi - 2p_1 S_\psi + S_\psi d_6)}}{p_2 + d_2 + d_3 + C_\psi S_\psi d_6}$$

где t_1 – тангенс половины первого угла;

p_1, p_2 – абсцисса и ордината целевого положения захватного устройства;

$C_\psi, C_\theta, S_\psi, S_\theta$ – синусы и косинусы соответствующих углов Эйлера целевого положения;

d_i – длина i -того звена;

И решение для пятого угла:

$$t_5 = \frac{2 + 2t_1^2 \pm \sqrt{(2 + 2t_1^2)^2 - 4(C_\psi S_g + 2S_g S_\psi t_1 - C_\psi S_g t_1^2)}}{2(C_\psi S_g + 2S_g S_\psi t_1 - C_\psi S_g t_1^2)},$$

где t_5 – тангенс половины пятого угла.

Данный подход решения обратных кинематических задач апробирован на трех разных кинематических схемах манипуляторов. Было замечено, что, во всех случаях методы и приемы очень сходны. Имеются конструкции типа «неположительное число под радикалом» (2) и соотношения типа (3).

Далее в главе проведен сравнительный анализ предлагаемого автоматизированного метода определения аналитического решения с традиционным геометрическим. Вторым методом, проанализированным автором, приведен для иллюстрации. Достоинством геометрического метода является наглядность, а недостатком то, что далеко не для каждой кинематической схемы возможно найти решение. Для поиска решения математик-разработчик должен подробно и аккуратно рассмотреть все возможные конфигурации робота. Причем, как показано на примерах, некоторые конфигурации могут быть «плохими», то есть решение в этих конфигурациях может быть неустойчивым и, следовательно, ошибки машинного округления оказываются решающими. По причине вышеизложенного, перспективы автоматизации здесь неясны. Большую роль играет так называемый человеческий фактор со всеми вытекающими отсюда последствиями – увеличением времени на разработку и отладку и, следовательно, увеличением себестоимости программного обеспечения.

Для нахождения решений традиционным геометрическим методом была затрачена ориентировочно рабочая неделя для вычислений, рабочий день для программной реализации и еще порядка недели для отладки. Для решения предложенным автором методом был затрачен один рабочий день поиска решений, и еще один день для программной реализации и отладки.

В качестве наиболее перспективных, в максимальной степени соответствующих требованиям эргономики, предложены алгоритмы ручного управления движением манипулятора по траекториям от задающих рукояток, базирующиеся на использовании решений обратной задачи кинематики. Эти алгоритмы реализуют позиционно-скоростные законы управления. Задающие рукоятки представляют собой два трехстепенных джойстика, перемещения которых интерпретируются как задание вектора скорости.

На основе разработанной автором методики анализа динамики манипуляторов с разомкнутыми кинематическими цепями, выполнен анализ экспериментального образца космического робота "*Dores*". Для определения параметров его приводов получены общие выражения для моментов, которые возникают в шарнирах при выполнении набора типовых движений. Исследования доведены до конкретных, практических рекомендаций по изменению параметров приводов, реализованных в этом роботе. Показано, что первый

и второй шарниры вполне хорошо справляются с движениями, их привода нагружены в пределах номинального момента. Третий шарнир требует увеличения максимального момента привода приблизительно в 1,5 раза. Четвертый и пятый шарниры сильно недогружены и могут быть заменены на менее мощные. Предполагается, что полученные рекомендации будут учтены при доработке конструкции в последующих модификациях.

Третья глава посвящена разработке алгоритмов управления космического робота "*Dores*". Рассмотрены алгоритмы построения программных траекторий при движении в свободной среде и при наличии препятствий. Анализируются алгоритмы отработки траекторных измерений с учетом динамики манипулятора.

Исследуются проблемы использования космическими роботами систем технического зрения (СТЗ). Рассматриваются алгоритмы работы СТЗ при выполнении следующих основных функций:

- выделении и опознавании идентификационных графических примитивов выделенных объектов;
- определении координат целевых точек реперного типа;
- использовании в системе безопасности движения для контроля отсутствия угрозы столкновения;
- модификации модели мира, при появлении новых визуальных элементов в рабочей зоне робота;
- привязки подвижного технологического модуля (ТМ) к модели мира;
- использовании в системе технической диагностики в качестве внешнего дополнительного датчика.

Показано, каким образом СТЗ принципиально позволяет реализовать адаптивную калибровку. Рассмотрены перспективы использования СТЗ для выявления неисправностей и опасных ситуаций при работе космического робота, а также частичной компенсации отказов отдельных его функциональных элементов, например, датчиков обратных связей.

Анализируются проблемы использования СТЗ при выполнении космическим манипулятором основных технологических операций. Рассмотрены операции контроля окружающей обстановки, включающие: определение неизвестных препятствий, контроль рабочего органа манипулятора и процессов сборки и разборки. Проанализировано локальное использование СТЗ при выполнении операций контроля, диагностики и замены элементов, устройств и конструкций космических объектов.

Исследованы проблемы калибровки СТЗ. Под калибровкой здесь понимается определение координат телекамеры в системе координат захватного устройства манипулятора.

Обычно для калибровки системы технического зрения рабочий орган манипулятора с телекамерой вводится в контакт со специальным кондуктором с маркерами и определяются координаты захватного устройства. Главным недостатком этого способа является невысокая точность контакта захватного устройства манипулятора со стыковочным узлом кондуктора, так как требуемая точность стыковки для калибровки не является обязательной для стыковки ЗУ с полезным грузом и, соответственно, ЗУ не изготавливается с требуемой точностью.

Автором предложен оригинальный способ калибровки с помощью зеркала. Этот способ заключается в определении на *самом* захватном устройстве характерных точек или установке специальных маркеров, геометрия которых известна из конструкции захватного устройства. Плоское зеркало устанавливается так, чтобы отражения в зеркале этих характерных точек (маркеров) были видны телекамере (см. рис. 4). Затем производится вычисление координат точек на захватном устройстве в системе координат телекамеры по тому изображению, что видит телекамера. Зная априори положения всех точек в системе координат захватного устройства и вычислив их координаты с помощью зеркала в системе координат телекамеры, вычисляется искомая матрица перехода от захватного устройства к телекамере.

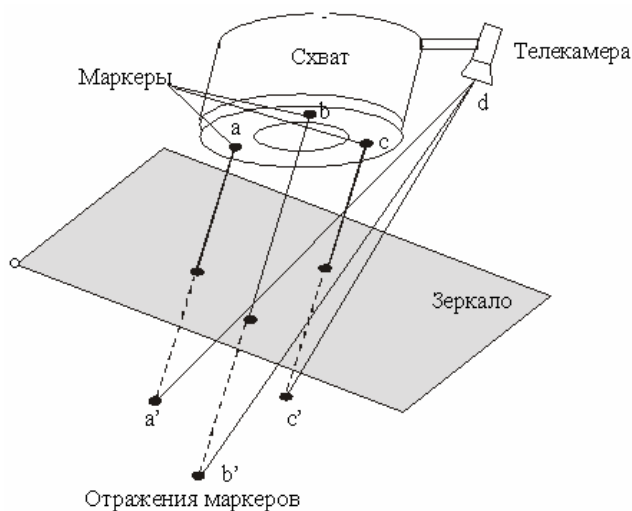


Рисунок 4 – Калибровка СТЗ, используя зеркало

Для вычисления предложен оператор отражения:

$$P(\vec{x}) = \vec{x} - 2 \frac{(\vec{x}, \vec{n})}{n^2} \vec{n} + 2\vec{n}$$

где \vec{x} - отражаемый вектор, \vec{n} - вектор нормали зеркала. Уравнение плоскости зеркала предполагается заданным в следующей форме $(\vec{y}, \vec{n}) = n^2$. Вектор нормали к

плоскости зеркала определяется как промежуточный результат в результате вычислений, что можно использовать в случае, когда и телекамера, и маркеры расположены стационарно, а на объекте наблюдения находится отражающая поверхность.

Перспективность этого способа подтверждена экспериментальными исследованиями на базе космического робота “*Dores*”.

Разработана программная реализация системы управления, реализующая все методы, описанные в работе. Главная задача, решенная здесь, это способ построения унифицированного ПО, которое может быть оперативно переналажено на выполнение дополнительных операций и/или на управление другим робототехническим средством.

Надо отметить, что это ПО включено в систему управления не только манипулятора “*Dores*”, но и в СУ других РТС: манипулятора мобильного комплекса «*Берлога-Р*» (выпускаемого серийно по заказу МО РФ), космического манипулятора «*Аист*», мобильной робототехнической платформы. Главная идея подобного построения ПО заключается в разделении потока ввода информации от датчиков, потока вычисления управления и потока вывода управления на приводы. Построена четкая и прозрачная иерархия классов (объектов) и каналы обмена информацией между ними. Перенастройка ПО на другую РТС занимает порядка одного - двух часов рабочего времени.

В четвертой главе описана аппаратная реализация манипулятора.

Построение робота – модульное: каждый шарнир представляет собой мехатронный модуль, состоящий из вентильного электродвигателя, волнового редуктора, контроллера и датчиков вращения на основе вращающихся трансформаторов. Все привода и управляющая ЭВМ соединены в единую информационную магистраль – скоростную CAN-сеть.

Звенья манипулятора образованы замкнутыми профилями и имеют высокую жесткость. Рабочие органы манипулятора – сменные, предусмотрен магазин рабочих органов, наполнение которого может пополняться различными инструментами. Приведены технические характеристики приводов и их структурные схемы.

В заключение главы описан разработанный автором способ испытания робота на точность позиционирования.

Выводы сформулированы отдельно по главам, в концентрированном виде они представлены в **Заключении**.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертации, формулируются следующим образом.

1. Для космических орбитальных роботов предложена система элементарных фреймов (операций, переходов) и модулей, обеспечивающая эффективное формирование программного обеспечения супервизорным управлением операций монтажа, обработки, переноса полезных грузов, слежения и захвата движущихся объектов (пролетающих спутников).

2. Реализован оригинальный метод формализованного вывода аналитических решений обратной задачи кинематики для ангулярных манипуляторов орбитальных космических роботов. Данный метод базируется на формализме Денавита-Хартенберга и выявленных особенностях матричных уравнений, описывающих манипуляторы данного вида.

3. Показано, что по сравнению с традиционными геометрическими моделями предложенный автором метод более приспособлен для автоматизации вычислений и программирования движений космических робототехнических систем. Он может быть использован также для динамически реконфигурируемых манипуляционных систем и в других областях робототехники.

4. Разработаны алгоритмы эргономичного ручного управления движением манипулятора по траекториям от задающих рукояток, базирующиеся на аналитических решениях обратной задачи кинематики.

5. Сформулированы предложения по изменению параметров приводов по результатам расчетов зависимостей моментов нагрузки в шарнирах при типовых движениях манипулятора.

6. Разработан и реализован оригинальный метод калибровки телекамеры системы технического зрения посредством зеркала, что позволяет оперативно, просто и точно выполнять важную операцию привязки телекамеры к роботу.

7. Предложена структура программного обеспечения управления космическими орбитальными робототехническими системами, отличающаяся ускорением и сокращением трудоемкости разработки систем подобного назначения.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Васильев И.А. Создание тренажеров для технических систем. // Материалы 2-й научно-технической конференции «Тренажерные технологии и симуляторы-2003» - СПб., 2003. - С. 65-71.
2. Васильев И.А. Архитектура программного обеспечения системы управления динамическими объектами. // «Искусственный интеллект», 2003 - №3 - С. 48-56
3. Васильев И.А. Система безопасности манипуляционных роботов. // «Искусственный интеллект», 2003 - №4. - С. 122-127.
4. Васильев И.А., Половко С.А. Структуризация и унификация программного обеспечения. // XXXII неделя науки СПбГПУ, материалы межвуз. научно-техн. конф. – СПб.: Изд-во Политех. унт-та, 2003. - Ч V. - С. 209-210.
5. Васильев И.А., Ляшин А.М. Разработка программного обеспечения системы управления робототехническими средствами. // Труды Международной школы-семинара «Адаптивные роботы-2004». – СПб., 2004. - С. 55-58.
6. Васильев И.А., Ляшин А.М. Юстировка системы технического зрения с использованием отражения ориентиров от зеркальной поверхности. // «Искусственный интеллект», 2004. - №3 - С. 222-227
7. Lyashin A.M., Vasilyev I.A. Classification and analytical solution for inverse kinematical problem for 6-DOF manipulators. // Труды конференции «Mechatronics & Robotics '04» - Aachen, 2004 - P. 548-550.
- 8. Васильев И.А., Ляшин А.М. Аналитическое решение обратной кинематической задачи для шестизвенных роботов-манипуляторов. // «Автоматизация в промышленности» (из списка ВАК), 2008 - №10 – С. 3-5.**