

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. И. Капля, Е.В. Капля

ОПЕРАТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Электронное учебное пособие



Волгоград
2017

УДК 658.52(07)
ББК 32.966
К 203

Рецензенты:

Филиала ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Волжском,
зав. кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств», канд. тех. наук, доцент

И. А. Болдырев,

Волгоградский государственный технический университет,
доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств»

канд. тех. наук

А.Г. Алехин

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Капля, В. И.

Оперативное планирование и управление автоматизированным производством [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В. И. Капля; Е. В. Капля ; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 498 КБ). – Волгоград, 2017. - Режим доступа: <http://lib.volpi.ru>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-9948-2767-3

Содержит сведения о принципах оперативного планирования и управления автоматизированным производством. Изложение теоретического материала сопровождается информацией и примерами среде OpensCad.

Рекомендуется для использования в учебном процессе по техническим специальностям, в том числе по направлению 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» (уровень магистратуры), при изучении дисциплины «Оперативное планирование и управление автоматизированным производством» для студентов дневной, вечерней и заочной форм обучения.

Ил. 12, библиограф.: 26 назв.

ISBN 978-5-9948-2767-3

© Волгоградский государственный
технический университет, 2017

© Волжский политехнический
институт, 2017

Содержание

Введение	4
1. Основные положения оперативного планирования и управления автоматизированным производством	5
2. Математические модели манипуляторов	14
2.1. Построение систем координат для звеньев манипулятора	15
2.2. Рекуррентный алгоритм решения прямой позиционной задачи для манипулятора PUMA	23
2.3. Обратная позиционная задача. Метод обратных преобразований....	25
2.4. Решение обратной позиционной задачи для манипулятора PUMA..	26
2.5. Численное решение обратной позиционной задачи	30
3. Планирование движения манипулятора	30
3. Планирование движения манипулятора	31
3.1. Перемещение из точки в точку с постоянной скоростью.....	32
3.2. Специальная параметризация скорости перемещения схвата	33
3.3. Полиномиальная интерполяция зависимости координаты манипулятора от времени	34
3.4. Обход последовательности точек с использованием кубической сплайн интерполяции	35
4. Управление манипулятором в пространстве координат схвата	37
4.1. Управление по положению схвата.....	37
4.2. Формирование программной траектории схвата	38
4.3. Линеаризованный позиционный алгоритм управления	39
4.4. Управления по вектору скорости и по вектору ускорения	41
4.5. Управление по вектору силы.....	43
4.6. Планирование траектории с помощью частотной фильтрации на основе двумерного преобразования Фурье.....	44
Литература	52

Введение

Автоматизированное производство является многогранной областью производственной сферы и решение проблем его оперативного планирования и управления требует использования как общих подходов для планирования и управления [1-6], так и специфичных методов и методик.

В данном пособии рассматриваются вопросы оперативного планирования и управления специфичные для автоматизированного производства с использованием манипуляционных роботов, так как для такого производства эти вопросы разработаны наиболее четко и проработаны достаточно подробно.

В первом разделе пособия рассматриваются основные положения оперативного планирования и управления автоматизированным производством, рассматриваются специальные информационные потоки планирования и управления автоматизированных производственных систем. Во втором разделе приводится описание математической модели манипуляторов, являющейся основой для планирования и управления манипуляционными роботами. В третьем разделе описываются методики планирования и управления движением манипуляторов автоматизированных роботизированных производств.

Пособие предназначено для изучения дисциплины «Оперативное планирование и управление автоматизированным производством» для студентов, обучающихся по направлению 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» (уровень магистратуры).

1. Основные положения оперативного планирования и управления автоматизированным производством

Оперативное управление производством (ОУП) – это координация и регулирование выполнения оперативно-календарных планов производства и производственных заданий в реальном времени [1-6]. По своей сущности ОУП представляет собой деятельность по регулированию материальных и информационных потоков на предприятии, координации использования оборудования и персонала, а также действия направленные на выявление текущих потребностей рынка и оптимизацию взаимодействия с клиентами.

Автоматизированное производство в оперативном управлении производством выделяется необходимостью создания дополнительных специальных информационных потоков для обеспечения функционирования автоматизированных систем:

- алгоритмы и программы автоматического функционирования;
- алгоритмы и программы человеко-машинного интерфейса;
- обновления программного обеспечения;
- оцифрованные данные об изготавливаемых изделиях;
- обновление баз данных о технологических параметрах изготавливаемых изделий.

Объем и сложность специальных информационных потоков для обеспечения функционирования автоматизированных систем определяются уровнем автоматизации производственного процесса. Примером производственного процесса с высоким уровнем автоматизации являются производственные процессы, в которых используются манипуляционные роботы. Процесс перемещения обрабатывающего инструмента манипуляционным роботом по заданной траектории по поверхности обрабатываемого изделия требует:

- точной информации о поверхности обрабатываемого изделия;
- данных о технологических операциях, осуществляемых инструментом манипуляционного робота;
- алгоритмы и программы работы манипуляционного робота, соответствующие реализуемой технологии обработки.

Одной из главных функций оперативного управления является планирование. Оперативное планирование конкретизирует и обеспечивает выполнение заданий, установленных текущим планом. При этом уточняются объем и номенклатура продукции, подлежащей изготовлению в заданный период. Для каждого цеха и его подразделений устанавливаются месячные и декадные графики, производственные программы. Оперативно-производственное планирование (ОПП) является составной частью внутризаводского планирования, его завершающей стадией и заключается в детализации показателей текущего (тактического) плана производственно-хозяйственной деятельности предприятия по исполнителям (цехам, бригадам, участкам, рабочим местам) и срокам с целью равномерного выполнения производственной программы и эффективного использования трудовых, материальных, финансовых и других ресурсов.

Оперативное планирование – вид планирования, подразумевающий составление планов на короткие промежутки времени, представляющий намеченные ранее работы в максимально детализированном виде. Производственная программа предприятия детализируется в течение декады, недели, суток и смены. Оперативное планирование – завершающий этап общего процесса планирования на предприятии.

Ключевая *цель* оперативного планирования – организация равномерного производства продукции, соответствующей определенным критериям качества, в заданных объемах.

Отличительные черты оперативного планирования:

- Оперативное планирование осуществляется менеджерами низшего и среднего уровня, тогда как стратегическое планирование – обязанность руководителей высшего ранга.
- Оперативные решения являются рутинными и принимаются ежедневно, а стратегические требуют более длительного времени.
- Оперативное планирование не требует разработки альтернативных вариантов, которые являются обязательными для стратегических планов.
- Стратегическое планирование рассматривает, в том числе и внешние информационные источники, тогда как оперативное планирование – только внутренние.

Базовой *задачей*, которую должно решать оперативное планирование, считается организация работы сотрудников компании таким образом, чтобы производство было эффективным. Есть также ряд задач второй степени значимости:

- Создание комплексного производства.
- Эффективное расходование рабочего времени.
- Выполнение заданий по выпуску готовой продукции.

Оперативное планирование (ОПП) является завершающим этапом внутри производственного планирования. Оно призвано конкретизировать и довести планы предприятия до цеха, участка, рабочего места, обеспечить равномерное и комплексное выполнение планов выпуска готовой продукции при рациональном использовании ресурсов. На уровне цеха

(производственного подразделения организации) и участка (бригады) разрабатываются оперативно-календарные планы, в которых месячные программы (задания) разбиваются на более короткие промежутки времени: декаду, сутки, смену.

Взаимное увязывание цеховых планов осуществляется с помощью межцехового планирования. Внутрицеховое планирование координирует работу участков, бригад, рабочих мест и вспомогательных служб цеха.

В зависимости от целенаправленности задач и методов их решения в оперативном планировании выделяются три взаимосвязанных этапа:

- объемное планирование,
- календарное планирование,
- диспетчирование, то есть непрерывный контроль текущего состояния.

Под *системой оперативного планирования* понимаются методика и техника исполнения функций оперативного планирования. Наиболее распространенными в машиностроении считаются, например, позаказная, комплектная и поддетальная системы планирования и ряд их разновидностей. Системы оперативного планирования имеют унифицированные *процедуры принятия плановых решений*, однако в зависимости от типа производства эти процедуры имеют особенности.

Одним из основных элементов оперативного планирования на предприятии являются принципы планирования, которые определяют его характер и содержание. Выделяют четыре основных принципа планирования:

- единство,
- непрерывность,
- гибкость и
- точность.

Часто выделяют еще один ключевой принцип планирования – ***принцип участия.***

Кроме того, выделяют принципы:

самостоятельности и

эффективности.

Единство – предприятие представляет собой сложную, многоуровневую социально-экономическую систему, состоящую из ряда подсистем, в каждой из которых осуществляется функция планирования, т.е. планирование должно быть системным.

Непрерывность – процесс планирования на предприятии должен осуществляться постоянно в рамках жизненных циклов программ и проектов, а ***разработанные планы должны постоянно корректироваться.***

Гибкость – направленность и предварительные параметры планов должны меняться при возникновении непредвиденных обстоятельств, поэтому необходимо предусматривать финансовые резервы.

Точность – планы должны составляться с максимальной точностью, т.е. должны быть детальными и конкретными.

Участие – каждый работник предприятия становится участником процесса плановой деятельности, независимо от должности и выполняемой им функции, в результате чего каждый работник уясняет себе цели и задачи деятельности предприятия в целом и отдельных его подразделений.

Самостоятельность – по вертикали происходит интеграция и дифференциация плановых заданий, по горизонтали – координация планов по подразделениям предприятия.

Эффективность – затраты на планирование не должны превышать эффект от него, т.е. планы должны конкретизироваться и детализироваться настолько, насколько это необходимо для определения уровня доходности продукции.

Реализация перечисленных принципов позволяет планировать производственный процесс в соответствии с потребностями потребителей и производителей, существенно сокращать трудозатраты, материальные издержки, количество запасов и объемы незавершенного производства.

Объектами планирования на предприятии являются функции, которые оно выполняет в процессе работы. Согласно специфике своей деятельности предприятия выполняют разные функции. Поскольку планирование на предприятии – это не только бизнес-процесс, но и процесс управления, к объектам планирования относятся все функциональные процессы, в том числе производственные и управленческие, которые выполняются в конкретных подразделениях.

Предметом планирования на предприятии являются ресурсы, поскольку принятие решений о развитии предприятия всегда связано с использованием ресурсов, причем учитываются не только имеющиеся, но и все необходимые ресурсы.

Целью планирования ресурсов выступает, прежде всего, их оптимизация.

Чаще всего речь идет о следующих видах ресурсов:

- трудовых (персонал предприятия);
- материальных;
- финансовых;
- информационных.

Специалисты наряду с перечисленными видами ресурсов предприятия выделяют временной ресурс и предпринимательский талант, который представляет собой вид людских ресурсов, представленный деятельностью по координации и комбинированию всех других ресурсов. Предпринимательский талант проявляется в умении максимально рационально осуществлять производственную и коммерческую деятельность, основанную на новаторстве, ответственности и склонности к обоснованному риску

Планирование можно рассматривать как функцию управления предприятием. Управление предприятием представляет собой целенаправленное, упорядочивающее воздействие команды управления, согласующее и объединяющее работников для совместной трудовой деятельности.

Оперативное планирование – основа для принятия решений, связанных с управлением различных подразделений предприятия. Оно представляет собой управленческую деятельность: определение целей и задач управления отдельными подразделениями, разработку путей реализации представленных планов для достижения поставленных целей, координация работы всех подразделений, иными словами – разработка возможности развития предприятия в целом, а также расчет объема необходимых ресурсов и их распределение.

Планирование как функция управления взаимосвязано с другими функциями:

- организацией;
- мотивацией;
- координацией (регулирующим);
- контролем.

Основной целью оперативного планирования является выполнение производственной программы по критериям количества, качества, сроков и затрат.

Исходя из поставленной цели, можно выделить следующие **задачи оперативного планирования**:

- обеспечение ритмичности выполнения производственной программы;
- снижение производственного брака;
- оптимальная загрузка технологического оборудования, производственных мощностей и рабочих;
- экономичное расходование ресурсов;
- охрана труда работников и окружающей среды.

Модель процесса оперативного управления на предприятии детализирует последовательность шагов этого процесса, и включает три основных ключевых этапа:

- оперативное планирование;
- оперативная организация;
- оперативный контроль и регулирование.

Оперативное планирование представляет собой корректировку планов и доведение их до конкретных исполнителей при рациональном использовании всех ресурсов предприятия.

Оперативная организация включает следующие компоненты:

- корректировка и распределение функций;
- оценка вариантов планирования;
- возможность перераспределения ресурсов.

Оперативный контроль и регулирование необходимы для успешного завершения принятых решений, как на стратегическом, так и на тактическом (текущем) уровне.

Оперативные решения имеют ряд отличительных особенностей:

- направленность на краткосрочные цели и возможности;
- субъективизм оценки некоторых показателей планирования;
- степень риска, связанную с корректировкой всех планов предприятия.

Автоматизированному производству присуще использование роботов-манипуляторов или подобных производственных систем, которые выполняют операции обработки отдельных деталей или сборки готовых изделий. Планирование работы автоматизированных производственных систем требует нетривиальной оперативной подготовки и сопровождения технологических процессов.

Обработка каждой новой детали или сборка новой компоновки изделия требует оперативного планирования и управления алгоритмами работы автоматизированного оборудования.

2. Математические модели манипуляторов

Манипулятор – механизм, обладающий несколькими степенями подвижности, который предназначен для перемещения и ориентации объектов или закрепленного обрабатывающего инструмента в рабочем пространстве манипуляционного робота [7-26]. Закрепление манипулятора с объектами и инструментами осуществляется с помощью специального устройства, называемого «схватом» или «рабочим органом».

Математическая модель манипулятора является основой для планирования и расчета перемещения и ориентации схвата в процессе выполнения технологических (производственных) операций.

Роботы-манипуляторы исследуют с помощью системы присущих им математических моделей: кинематические схемы, динамические модели, алгоритмы конечных автоматов.

Кинематическая схема (кинематическая цепь) представляет собой графическое изображение последовательности звеньев манипулятора, соединенных между собой сочленениями [8]. Различают два базовых (элементарных) типа сочленений с одной степенью свободы: вращательный и поступательный. При наличии первого из них относительное расположение смежных звеньев определяется угловой переменной, при наличии второго — линейным смещением. В обоих случаях эти переменные называются компонентами обобщенных координат:

$$q_i = \begin{cases} \theta_i, & \text{если звено вращательное;} \\ d_i, & \text{если звено поступательное.} \end{cases}$$

Сложные сочленения со степенями свободы более одной рассматриваются как комбинация, составленная из вращательных и поступательных сочленений.

Кинематический анализ работа-манипулятора предполагает решение двух основополагающих задач: прямой и обратной задач кинематики.

Прямая задача кинематики (ПЗК) заключается в расчете координат положения и ориентации системы координат, связанной со схватом или рабочим инструментом, при заданном наборе обобщенных координат манипулятора.

Обратная задача кинематики (ОЗК) заключается в расчете набора обобщенных координат манипулятора при заданных координатах положения и ориентации конечной системы координат, связанной со схватом или рабочим инструментом.

2.1. Построение систем координат для звеньев манипулятора

Процесс функционирования манипулятора обеспечивается изменением взаимного положения звеньев, скрепленных подвижными сочленениями. Изменение состояния сочленений обеспечивает приводами этих сочленений. Согласованная работа приводов сочленений обеспечивает требуемые перемещения захвата (инструмента) манипулятора [7,15-19].

Положение и ориентация твердого тела (или системы координат, связанной с этим телом) в пространстве однозначно определяется шестью координатами: тремя линейными (декартовыми) и тремя угловыми (например, углами Эйлера). Использование метода, предложенного в 1955 г. учеными Жаком Денавитом и Ричардом Хартенбергом, позволяет сократить это число до четырех параметров, называемыми параметрами Денавита-Хартенберга. Такое упрощение достигается с помощью стандартизированного алгоритма привязки систем координат к звеньям

манипулятора. Пример кинематической схемы с указанием систем координат звеньев [7] приведен на рис.2.1 и 2.2.

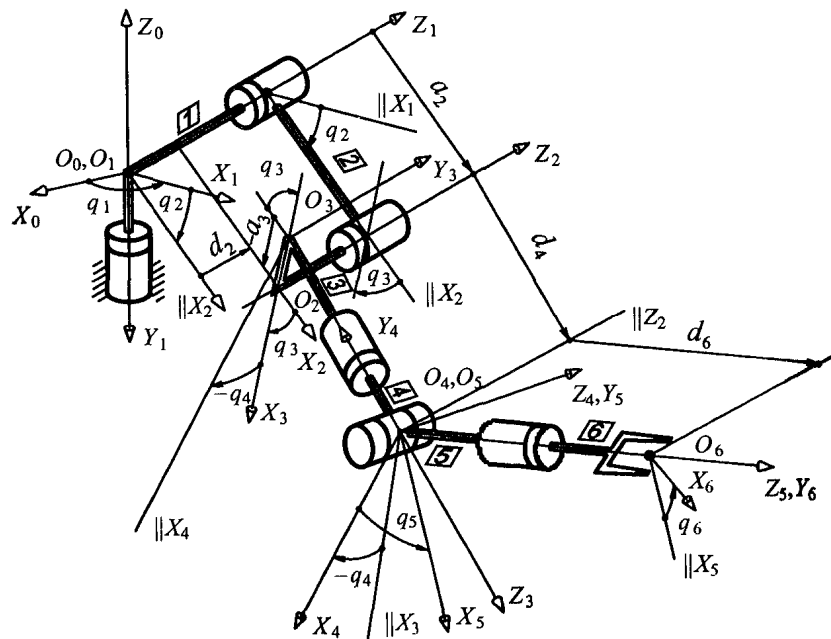


Рис.2.1. Кинематическая схема манипулятора PUMA-600

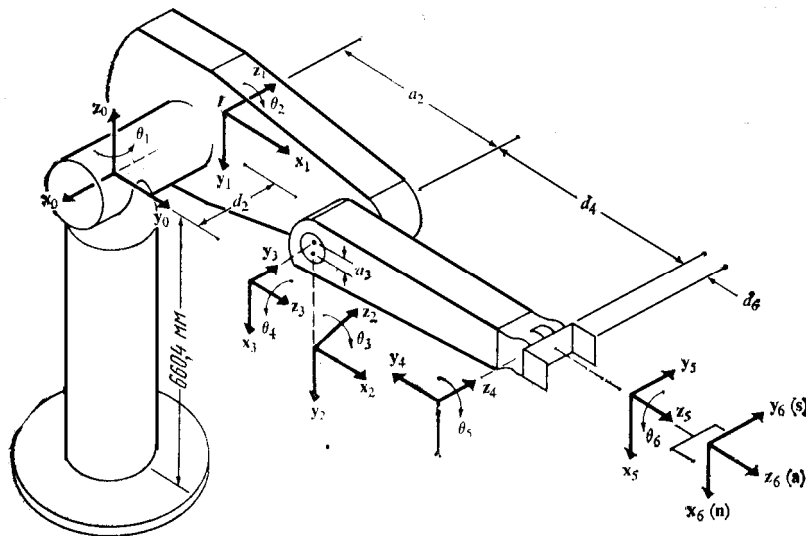


Рис.2.2. Внешний вид манипулятора PUMA-600

Смысл представления Денавита–Хартенберга [9] состоит в формировании однородной матрицы преобразования, имеющей размерность 4×4 и описывающей положение системы координат каждого звена относительно системы координат предыдущего звена. Это дает возможность последовательно преобразовать координаты схвата

манипулятора из подвижной системы отсчета, связанной с последним звеном, в базовую неподвижную систему отсчета, являющейся инерциальной системой координат для рассматриваемой динамической системы.

Пример построения взаимосвязанных систем координат для смежных звеньев по алгоритму Денавита–Хартенберга приведен на рис.2.3 [26].

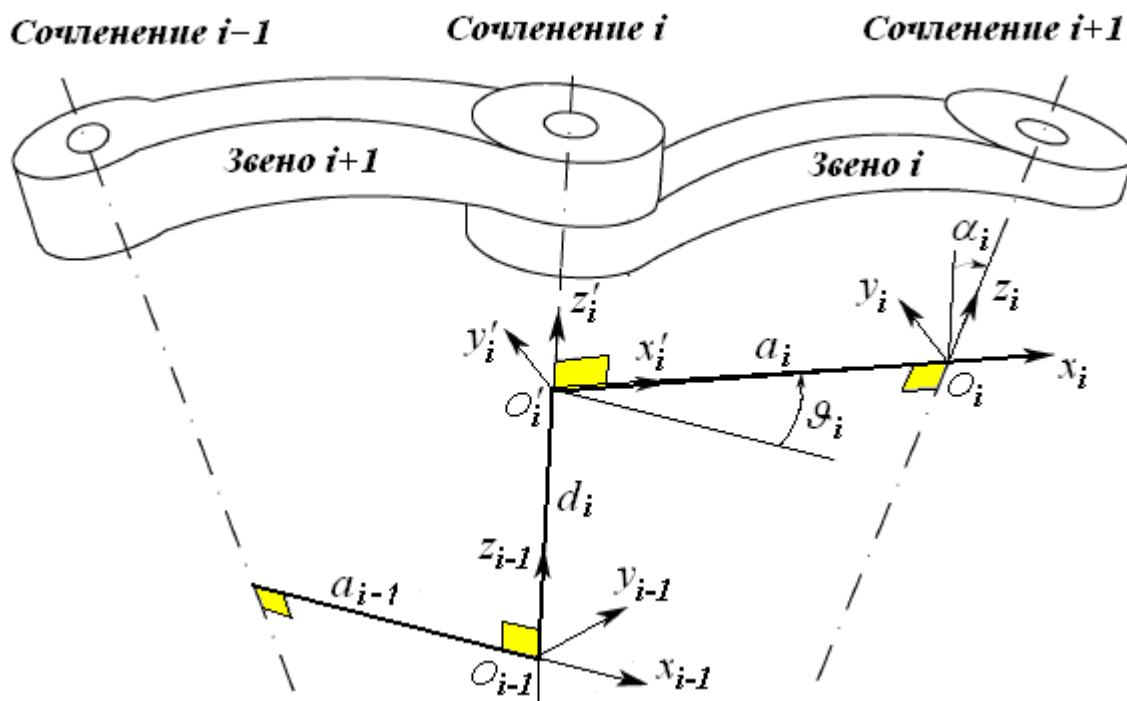


Рис.2.3. Системы координат смежных звеньев

Каждая система координат формируется на основе следующих трех правил:

- 1) ось z_{i-1} направлена вдоль оси i -того сочленения;
- 2) ось x_i перпендикулярна оси z_{i-1} и направлена от нее;
- 3) ось y_i дополняет оси x_i, z_i до правой декартовой системы координат.

Представление Денавита–Хартенберга твердых звеньев зависит от четырех геометрических параметров, соответствующих каждому звену. Эти четыре параметра полностью описывают любое вращательное или поступательное движение и определяются в соответствии с рис. 2.3 следующим образом:

ϑ_i – угол, на который надо повернуть ось x_{i-1} вокруг оси z_{i-1} , чтобы она стала параллельна с осью x_i (знак определяется в соответствии с правилом правой руки);

d_i – расстояние между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и началом $(i-1)$ -й системы координат, отсчитываемое вдоль оси z_{i-1} ;

a_i – линейное смещение – расстояние между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и началом i -й системы координат, отсчитываемое вдоль оси x_i , т. е. кратчайшее расстояние между осями z_{i-1} и z_i ;

α_i – угловое смещение – угол, на который надо повернуть ось z_{i-1} вокруг оси x_i , чтобы она стала параллельной с осью z_i (знак определяется в соответствии с правилом правой руки).

Для вращательных сочленений параметры d_i , a_i и α_i являются характеристиками сочленения, постоянными для данного типа робота. В то же время ϑ_i является переменной величиной, изменяющейся при движении (вращении) i -го звена относительно $(i-1)$ -го. В качестве примера в нижеследующей таблице приведены параметры звеньев и сочленений робота-манипулятора PUMA.

Параметры систем координат звеньев манипулятора PUMA					
Сочленение i	ϑ_i	α_i	a_i	d_i	Пределы измерения
1	90	-90	0	0	-160-+160
2	0	0	431,8 мм	149,09 мм	-225-45

3	90	90	-20,32 мм	0	-45-225
4	0	-90	0	433,07 мм	-110-170
5	0	90	0	0	-100-100
6	0	0	0	56,25 мм	-266-266

Для каждого звена манипулятора с n степенями свободы этот алгоритм формирует ортонормированную систему координат. Системы координат нумеруются в порядке возрастания от основания к схвату манипулятора. Взаимное расположение соседних звеньев описывается однородной матрицей преобразования размерностью 4×4 .

Шаг 1. *Формирование базовой системы координат.*

Сформировать правую ортонормированную систему координат (x_0, y_0, z_0) , связанную с основанием, ось z_0 вдоль оси 1-го сочленения к «плечу» манипулятора. Оси x_0 и y_0 выбираются произвольно при условии их перпендикулярности оси z_0 .

Шаг 2. *Начало и цикл.* Для всех i ($i=1,2 \dots n-1$) выполнить шаги 3-6.

Шаг 3. *Формирование осей сочленения.* Направить ось z_i вдоль оси движения (вращательного или поступательного) $i+1$ -го сочленения.

Шаг 4. *Формирование начала i -й системы координат.* Расположить начало i -й системы координат на пересечении осей z_i и z_{i-1} или на пересечении общей нормали к осям z_i и z_{i-1} с осью z_i .

Шаг 5. *Формирование оси x_i .* Выбрать единичный вектор x_i следующим образом: $x_i = \pm (z_{i-1} \times z_i) / \|z_{i-1} \times z_i\|$ или вдоль общего перпендикуляра к осям z_{i-1} и z_i , если они параллельны.

Шаг 6. *Формирование оси y_i .* Положить $y_i = (z_i \times x_i) / \|z_i \times x_i\|$, получив тем самым правостороннюю систему координат.

Шаг 7. *Формирование системы координат схвата.* Как правило, n -е сочленение является вращательным. Сформировать ось z_n , направив ее вдоль оси z_{n-1} и от манипулятора. Выбрать ось x_n так, чтобы она была перпендикулярна осям z_{n-1} и z_n .

Шаг 8. *Определение параметров звеньев и сочленений.* Для каждого i ($i=1\dots n$) выполнить шаги 9-12.

Шаг 9. *Определение d_i .* Расстояние d_i – от начала $(i-1)$ -й системы координат до пересечения оси z_{i-1} с осью x_i и началом i -й системы координат, отсчитываемой вдоль оси z_{i-1} . Если i -е соединение – поступательное, то d_i – присоединенная переменная.

Шаг 10. *Определение a_i* – расстояния между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и началом i -й системы координат, отсчитываемой вдоль оси x_i .

Шаг 11. *Определение ϑ_i* – угла поворота оси x_{i-1} вокруг оси z_{i-1} , чтобы она стала параллельна оси x_i . Если i -е сочленение – вращательное, то ϑ_i – присоединенная переменная.

Шаг 12. *Определение α_i* – угла поворота оси z_{i-1} вокруг оси x_i , чтобы она стала параллельна оси z_i .

После построения Денавита–Хартенберга координат для всех звеньев можно построить однородные матрицы преобразования, связывающие i -ю и $(i-1)$ -ю системы координат:

$${}^{i-1}A_i = T_{z,d} T_{z,\vartheta} T_{x,a} T_{x,\alpha} =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \vartheta_i & -\sin \vartheta_i & 0 & 0 \\ \sin \vartheta_i & \cos \vartheta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \vartheta_i & -\cos \alpha_i \sin \vartheta_i & \sin \alpha_i \sin \vartheta_i & a_i \cos \vartheta_i \\ \sin \vartheta_i & \cos \alpha_i \cos \vartheta_i & -\sin \alpha_i \cos \vartheta_i & a_i \sin \vartheta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.1)$$

Преобразуя (2-1), найдем, что матрица, обратная к матрице ${}^{i-1}A_i$, имеет вид:

$$[{}^{i-1}A_i]^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta_i & \sin \vartheta_i & 0 & -a_i \\ -\cos \alpha_i \cdot \sin \vartheta_i & \cos \alpha_i \cdot \cos \vartheta_i & \sin \alpha_i & -d_i \sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i \cdot \sin \vartheta_i & -\sin \alpha_i \cdot \cos \vartheta_i & \cos \alpha_i & -d_i \cos \alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

где α_i , a_i , d_i - константы, а θ_i - присоединенная переменная, если рассматриваемое сочленение – вращательное.

Используя матрицу ${}^{i-1}A_i$, можно связать однородные координаты p_i точки p относительно i -й системы координат (точка p определена в i -й системе координат) с односторонними координатами этой точки относительно $(i-1)$ -й системы отсчета, связанной с $(i-1)$ -м звеном. Эта связь устанавливается равенством:

$$p_{i-1} = {}^{i-1}A_i p_i, \quad (2.3)$$

где $p_{i-1} = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}, 1)^T$ и $p_i = (x_i, y_i, z_i, 1)^T$.

Для шестизвенного манипулятора PUMA известны [7,9,10] шесть матриц ${}^{i-1}A_i$, соответствующие показанным на рис.2.14. системам координат. Эти матрицы представлены ниже:

$${}^0A_1 = \begin{pmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad {}^1A_2 = \begin{pmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & a_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$${}^2A_3 = \begin{pmatrix} C_3 & 0 & S_3 & a_3C_3 \\ S_3 & 0 & -C_3 & a_3S_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, {}^3A_4 = \begin{pmatrix} C_4 & 0 & -S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$${}^4A_5 = \begin{pmatrix} C_5 & 0 & S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & -C_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, {}^5A_6 = \begin{pmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где $C_i \equiv \cos \theta_i$; $S_i \equiv \sin \theta_i$; $C_{ij} \equiv \cos(\theta_i + \theta_j)$; $S_{ij} \equiv \sin(\theta_i + \theta_j)$.

Результирующие матрицы преобразования координат соответствуют последовательному выполнению преобразований для первых трех звеньев и для последних трех звеньев манипулятора. Соответствующие матрицы преобразований имеют следующий вид:

$$T_1 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 = \begin{pmatrix} C_1C_{23} & -S_1 & C_1S_{23} & a_2C_1C_2 + a_3C_1C_{23} - d_2S_1 \\ S_1C_{23} & C_1 & S_1S_{23} & a_2S_1C_2 + a_3S_1C_{23} + d_2C_1 \\ S_{23} & 0 & C_{23} & -a_2S_2 - a_3S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$T_2 = {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 = \begin{pmatrix} C_4C_5C_6 - S_4S_6 & -C_4C_5S_6 - S_4C_6 & C_4S_5 & d_6C_4S_5 \\ S_4C_5C_6 - C_4S_6 & -S_4C_5S_6 + C_4C_6 & S_4S_5 & d_6S_4S_5 \\ -S_5C_6 & S_5S_6 & C_5 & d_6C_5 + d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Решение прямой задачи для манипулятора PUMA равно произведению полученных матриц $T_s = T_1T_2$ и позволяет вычислить по текущим параметрам состояния сочленений положение схвата.

Матрицу T_6 можно представить в виде:

$$T_6 = T_s = \begin{bmatrix} x_{6x} & y_{6x} & z_{6x} & p_x \\ x_{6y} & y_{6y} & z_{6y} & p_y \\ x_{6z} & y_{6z} & z_{6z} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Элементы матрицы T_6 для решения прямой позиционной задачи для манипулятора PUMA имеют следующий вид:

$$x_{6x} = c_1 [c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5s_6] - s_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6),$$

$$x_{6y} = s_1 [c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6] + c_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6),$$

$$x_{6z} = -s_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - c_{23}s_4s_6,$$

$$y_{6x} = c_1 [-c_{23}(c_4c_5s_6 + s_4c_6) + s_{23}s_5s_6] - s_1(-s_4c_5c_6 + c_4c_6),$$

$$y_{6y} = s_1 [-c_{23}(c_4c_5s_6 + s_4c_6) + s_{23}s_5s_6] + c_1(-s_4c_5c_6 + c_4c_6),$$

$$y_{6z} = s_{23}(c_4c_5s_6 + s_4c_6) + c_{23}s_5s_6,$$

$$z_{6x} = c_1(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5) - s_1s_4s_5,$$

$$z_{6y} = s_1(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5) + c_1s_4s_5,$$

$$z_{6z} = -s_{23}c_4c_5 + c_{23}c_5,$$

$$p_x = c_1 [d_6(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5) + s_{23}d_4 + a_3c_{23} + a_2c_2] - s_1(d_6s_4s_5 + d_2),$$

$$p_y = s_1 [d_6(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5) + s_{23}d_4 + a_3c_{23} + a_2c_2] + c_1(d_6s_4s_5 + d_4),$$

$$p_z = d_6(c_{23}c_5 + s_{23}c_4s_5) + c_{23}d_4 + a_3c_{23} - a_2s_2.$$

2.2. Рекуррентный алгоритм решения прямой позиционной задачи для манипулятора PUMA

В данном разделе приводятся расчетные соотношения, образующие для манипулятора PUMA рекуррентный алгоритм решения прямой позиционной задачи. Данный алгоритм имеет практическое значение, так как его применение менее требовательно к объему задействованной памяти в управляющей системе.

Запишем координатное соотношение [7]:

$$(\bar{x} \quad \bar{y} \quad \bar{z} \quad \bar{w}) \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = a\bar{x} + b\bar{y} + c\bar{z} + d\bar{w},$$

где \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} , \bar{w} – однородные векторы размером $\{4 \times 1\}$.

Обозначим матрицу положения i -го звена в абсолютной системе координат следующим образом:

$$T_i = \begin{bmatrix} \bar{x}_i & \bar{y}_i & \bar{z}_i & \bar{p}_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Векторы, определяющие положение и ориентацию всех звеньев:

$$\bar{x}_0 = (1, 0, 0)^T, \quad \bar{y}_0 = (0, 1, 0)^T, \quad \bar{z}_0 = (0, 0, 1)^T, \quad \bar{p}_0 = (0, 0, 0)^T.$$

Первое звено:

$$\bar{x}_1 = c_1\bar{x}_0 + s_1\bar{y}_0, \quad \bar{y}_1 = -\bar{z}_0, \quad \bar{z}_1 = -s_1\bar{x}_0 + c_1\bar{y}_0, \quad \bar{p}_1 = 0.$$

Второе звено:

$$\bar{x}_2 = c_2\bar{x}_1 + s_2\bar{y}_1, \quad \bar{y}_2 = -s_2\bar{x}_1 + c_2\bar{y}_1, \quad \bar{z}_2 = \bar{z}_1,$$

$$\bar{p}_2 = \bar{p}_1 + a_2c_2\bar{x}_1 + a_2s_2\bar{y}_1 + d_2\bar{z}_1 = \bar{p}_1 + a_2\bar{x}_2 + d_2\bar{z}_1.$$

Третье звено:

$$\bar{x}_3 = c_3\bar{x}_2 + s_3\bar{y}_2, \quad \bar{y}_3 = \bar{z}_2, \quad \bar{z}_3 = s_3\bar{x}_2 - c_3\bar{y}_2, \quad \bar{p}_3 = \bar{p}_2 + a_3\bar{x}_3.$$

Четвёртое звено:

$$\bar{x}_4 = c_4\bar{x}_3 + s_4\bar{y}_3, \quad \bar{y}_4 = -\bar{z}_3, \quad \bar{z}_4 = -s_4\bar{x}_3 + c_4\bar{y}_3, \quad \bar{p}_4 = \bar{p}_3 + d_4\bar{z}_3.$$

Пятое звено:

$$\bar{x}_5 = c_5\bar{x}_4 + s_5\bar{y}_4, \quad \bar{y}_5 = \bar{z}_4, \quad \bar{z}_5 = s_5\bar{x}_4 - c_5\bar{y}_4, \quad \bar{p}_5 = \bar{p}_4.$$

Шестое звено:

$$\bar{x}_6 = c_6\bar{x}_5 + s_6\bar{y}_5, \quad \bar{y}_6 = -s_6\bar{x}_5 + c_6\bar{y}_5, \quad \bar{z}_6 = \bar{z}_5, \quad \bar{p}_6 = \bar{p}_5 + d_6\bar{z}_5.$$

Приведённое решение прямой позиционной задачи удобно в вычислительном плане при моделировании кинематики манипулятора.

2.3. Обратная позиционная задача. Метод обратных преобразований

Исследуется задача [7] определения обобщенных координат звеньев q^* манипулятора по заданному положению s^* схвата:

$$q^* = f_s^{-1}(s^*).$$

Решение обратной позиционной задачи может привести к одному из трех возможных вариантов:

- задача имеет единственное решение,
- задача имеет более одного решения,
- задача не имеет решений.

Алгоритмы решения обратной позиционной задачи составляют основу в формировании управляющих сигналов манипулятора, так как технологически задается программное движение схвата и по нему необходимо определить движение звеньев.

Метод обратных преобразований базируется на аналитическом решении прямой задачи, то есть на использовании матрицы связи, позволяющей вычислять положение схвата:

$$T_s = A_1 A_2 \dots A_{N-1} A_N,$$

где $A_i = A_i(q_i)$ – матрица преобразования координат для i -того звена.

Матрицы преобразования координат являются невырожденными, поэтому можно получить следующий результат:

$$A_1^{-1}(q_1) T_s = A_2 \dots A_{N-1} A_N. \quad (2.4)$$

Если структура формулы (2.4) позволяет найти q_1 , то процесс повторяется для последующих обобщенных координат. Правую часть (2.4) следует считать константой, так как она не зависит от координаты q_1 .

2.4. Решение обратной позиционной задачи для манипулятора PUMA

Кинематическая схема манипулятора PUMA (рис.2.1) позволяет однозначно решить обратную задачу [7,9,10]. Особенность кинематической схемы манипулятора PUMA состоит в том, что оси вращения трех последних сочленений z_3, z_4, z_5 пересекаются в одной точке. Эта особенность позволяет найти координаты точки пересечения указанных осей:

$$p = p_4 = p_6 - d_6 z_6 = (p_x, p_y, p_z)^T. \quad (2.5)$$

Вычислив матрицу $T_4 = A_1 A_2 A_3 A_4$ и приравняв её правый столбец вектору (2.5), получим:

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1(a_2 c_2 + a_3 c_{23} + d_4 s_{23}) - d_2 s_1 \\ s_1(a_2 c_2 + a_3 c_{23} + d_4 s_{23}) + d_2 c_1 \\ -a_2 s_2 - a_3 s_{23} + d_4 c_{23} \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

Получена система трех тригонометрических уравнений с тремя неизвестными q_1, q_2, q_3 . Система (2.6) относительно угла q_1 решается путем сложения первых двух равенств после умножения их на величины $-s_1$ и c_1 соответственно, что позволяет исключить другие неизвестные величины:

$$-p_x s_1 + p_y c_1 = d_2. \quad (2.7)$$

Далее используются известные тригонометрические соотношения:

$$\sin \alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}, \quad \cos \alpha = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}.$$

Подстановка этих соотношений в (2.7) позволяет получить квадратное уравнение, решение которого имеет вид:

$$\operatorname{tg} \frac{q_1}{2} = \frac{-p_x \pm \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - d_2^2}}{p_y + d_2},$$

что позволяет получить искомое решение:

$$q_1 = 2 \operatorname{arctg} \frac{-p_x \pm \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - d_2^2}}{p_y + d_2}, \quad -\pi < q_1 < \pi. \quad (2.8)$$

Первый шаг в вычислении угла q_2 осуществляется путем сложения первых двух равенств после умножения их на c_1 и s_1 соответственно, что позволяет привести систему (2.6) к следующему виду:

$$\begin{aligned} a_2 c_2 + a_3 c_{23} + d_4 s_{23} &= p_x c_1 + p_y s_1 \\ -a_2 s_2 - a_3 s_{23} + d_4 c_{23} &= p_z \end{aligned} \quad (2.9)$$

Введение обозначения $Q = p_x c_1 + p_y s_1$ позволяет привести систему уравнений к следующему виду:

$$\begin{aligned} Q - a_2 c_2 &= a_3 c_{23} + d_4 s_{23} \\ p_z + a_2 s_2 &= -a_3 s_{23} + d_4 c_{23} \end{aligned}$$

Возведение в квадрат обеих частей уравнений и сложение их позволяет исключить неизвестную величину q_3 и получить следующее уравнение:

$$-p_z s_2 + Q c_2 = A,$$

где $A = \frac{Q^2 + p_z^2 + a_2^2 - a_3^2 - d_4^2}{2a_2}$.

Полученное уравнение структурно совпадает с уравнением (2.7), что позволяет определить искомую величину угла q_2 :

$$q_2 = 2 \operatorname{arctg} \frac{-p_z \pm \sqrt{p_z^2 + Q^2 - A^2}}{Q + A}, \quad -\pi < q_2 < \pi. \quad (2.10)$$

Вычисление величины угла q_3 начинается с преобразование системы уравнений (2.9) к виду линейной системы с промежуточными неизвестными s_{23} и c_{23} :

$$\begin{aligned} d_4 s_{23} + a_3 c_{23} &= p_x c_1 + p_y s_1 - a_2 c_2 \\ -a_3 s_{23} + d_4 c_{23} &= p_z + a_2 s_2 \end{aligned}.$$

Искомое промежуточное решение имеет вид:

$$s_{23} = \frac{d_4 B - a_3 C}{d_4^2 + a_3^2}, \quad c_{23} = \frac{d_4 C + a_3 B}{d_4^2 + a_3^2},$$

где $B = p_x c_1 + p_y s_1 - a_2 c_2$, $C = p_z + a_2 s_2$.

Искомое значение угла q_3 имеет вид:

$$q_3 = \arctg \frac{d_4 B - a_3 C}{d_4 C + a_3 B} - q_2, \quad -\pi < q_3 < \pi. \quad (2.11)$$

Вычисление углов q_4, q_5, q_6 является решением системы уравнений для проекций базисного вектора z_6 , которая получена при решении прямой задачи:

$$\begin{pmatrix} z_{6x} \\ z_{6y} \\ z_{6z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5) - s_1s_4s_5 \\ s_1(23c_4s_5 + s_{23}c_5) + c_1s_4s_5 \\ -s_{23}c_4s_5 + c_{23}c_5 \end{pmatrix}. \quad (2.12)$$

Система (2.12) относительно угла q_4 решается путем сложения первых равенств после умножения на величины $-s_1$ и c_1 соответственно, что позволяет получить следующее соотношение:

$$-s_1 z_{6x} + c_1 z_{6y} = s_4 s_5.$$

Умножение первого уравнения системы (2.12) на $c_1 c_{23}$, второго уравнения на $s_1 c_{23}$, третьего уравнения на $-s_{23}$, с последующим их сложением дает следующее соотношение:

$$c_1 c_{23} z_{6x} + s_1 c_{23} z_{6y} - s_{23} z_{6z} = c_4 s_5.$$

Деление правых и левых частей двух полученных выше соотношений позволяет выразить искомую величину угла q_4 :

$$q_4 = \arctg \frac{-s_1 z_{6x} + c_1 z_{6y}}{c_1 c_{23} z_{6x} + s_1 c_{23} z_{6y} - s_{23} z_{6z}}. \quad (2.13)$$

Из системы (2.12) для искомой величины q_5 , с учетом равенств $s_5 = z_6^T x_4$ и $c_5 = -z_6^T y_4$, следуют соотношения:

$$s_5 = (c_1 c_{23} c_4 - s_1 s_4) z_{6x} + (s_1 c_{23} c_4 - c_1 s_4) z_{6y} - c_4 s_{23} z_{6z},$$

$$c_5 = c_1 s_{23} z_{6x} + s_1 s_{23} z_{6y} - c_{23} z_{6z}.$$

Деление правых и левых частей двух полученных выше соотношений позволяет выразить искомую величину угла q_5 :

$$q_5 = \arctg \frac{s_5}{c_5}. \quad (2.14)$$

Вычисление угла q_6 основано на использовании следующих соотношений:

$$s_6 = x_6^T y_5, \quad c_6 = y_6^T y_5.$$

Подстановка в эти соотношения значений для компонент вектора y_5 , позволяет получить следующие соотношения:

$$s_6 = (-s_1 c_4 - c_1 c_{23} s_4) x_{6x} + (c_1 c_4 - s_1 c_{23} s_4) x_{6y} + s_4 s_{23} x_{6z},$$

$$c_6 = (-s_1 c_4 - c_1 c_{23} s_4) y_{6x} + (c_1 c_4 - s_1 c_{23} s_4) y_{6y} + s_4 s_{23} y_{6z}.$$

Искомый угол q_6 вычисляется по формуле:

$$q_6 = \arctg \frac{s_6}{c_6}. \quad (2.15)$$

Формулы (2.8), (2.10), (2.11), (2.13), (2.14) и (2.15) представляют собой решение обратной позиционной задачи для манипулятора PUMA. Следует отметить, что полученные формулы для значений углов сочленений, определенных по положению схвата, имеют определенный уровень неоднозначности по знаку и по кратности углу 180^0 .

2.5. Численное решение обратной позиционной задачи

Аналитическое решение обратной позиционной задачи существует не для всех кинематических схем манипуляторов, поэтому существует необходимость применения численных методов для решения таких задач. Обратная задача рассматривается как задача поиска корня уравнения:

$$f(q) = s^* . \quad (2.16)$$

Применение метода Ньютона, для решения системы нелинейных уравнений (2.16) соответствует следующему рекуррентному алгоритму:

$$q_{i+1} = q_i + J^{-1}(q_i)(s^* - f(q_i)), \quad (2.17)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots$, $J(q)$ – матрица $[6 \times N]$ Якоби:

$$J(q) = f'_q(q) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial q_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_6}{\partial q_1} & \frac{\partial f_6}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_6}{\partial q_N} \end{pmatrix} .$$

Существенное влияние на процесс решения (2.17) может оказать выбор начального приближения решения q_0 . Для обеспечения правильной и быстрой сходимости следует выбирать q_0 как можно ближе к точному решению, например с помощью какого-либо приближенного метода или предыдущего цикла применения данного метода при движении манипулятора.

В режиме реального времени для численного решения обратной позиционной задачи необходимо использовать высокопроизводительные вычислительные средства, либо решать эту задачу заранее, на этапе подготовки к работе манипулятора при планировании перемещений схвата (инструмента).

3. Планирование движения манипулятора

Планирование траектории движения манипулятора – это процедура расчета движения звеньев манипулятора с целью установки схвата (инструмента) в рабочую точку с заданной ориентацией. Указанная процедура должна учитывать кинематические и динамические свойства манипулятора, а так же возможные внешние препятствия для движения. Задаче планирования движения манипулятора свойственна зависимость от положения предыдущей рабочей точки и неоднозначность решения [7,9,11].

Процедура планирования движения должна выполняться автоматически (программно) с целью обеспечения заданной точности установки схвата, минимизации времени движения и безопасного преодоления препятствий. Движение манипулятора, как правило, назначается в рабочем пространстве на основе параметров траектории, таких как начальное и конечное местоположение захвата, возможные промежуточные местоположения и время движения по определенным геометрическим траекториям. В определенных случаях планирование движения манипулятора должно осуществляться в реальном времени

В целом алгоритм планирования реализуемой пространственной траектории должен иметь следующие особенности:

- генерируемые траектории должны просчитывать с относительно короткое время с учетом необходимости решения прямой и обратной задачи кинематики;
- алгоритмы управления должны обеспечивать непрерывность движения элементов манипулятора по положению, скорости и ускорению;
- величины скорости и ускорения должны планироваться с учетом физических ограничений на приводы манипулятора и технологические режимы работы перемещаемого инструмента.

Следует иметь в виду, что траектория захвата (инструмента) складывается из траекторий звеньев и сочленений манипулятора как результат из совместной работы в пространстве и времени.

3.1. Перемещение из точки в точку с постоянной скоростью

Рассматривается задача определения функции $q(t)$, которая описывает перемещение схвата манипулятора из начальной точки q^0 в конечную точку q^1 :

$$q(t_0) = q^0, \quad q(t_1) = q^1,$$

где $t \in [t_0, t_1]$ - текущее время перемещения схвата манипулятора, q^0 и q^1 - вектора начальной и конечной точек [7,9,11,26].

Приведенная формулировка не позволяет получить однозначного решения, поэтому необходимы дополнительные ограничения, например, движение по прямой, соединяющей начальную и конечную точки. В случае движения схвата по прямой линии с постоянной скоростью справедливо соотношение:

$$q(t) = q^0 + v \cdot (t - t_0), \quad (3.1)$$

где $v = \frac{q^1 - q^0}{t_1 - t_0}$ – вектор скорости перемещения схвата.

При назначении скорости перемещения необходимо учитывать величину максимальной скорости схвата v_{\max} в заданной области рабочей зоны манипулятора и нужном направлении:

$$|v| \leq v_{\max}.$$

Недостатком алгоритма движения согласно формуле (3.1) является проблема обеспечения постоянной скорости движения, так как типичным вариантом состояния схвата манипулятора в начальной и конечной точках

траектории является неподвижность, то есть фиксация состояния для работы схвата или инструмента.

3.2. Специальная параметризация скорости перемещения схвата

Рассмотрим задачу перемещения схвата по прямой линии с переменной скоростью [7], которая равна нулю в начальной и конечной точке. В этом случае, траектория разбивается по времени на 3 участка: участок разгона $t \in [t_0, t_1]$, участок движения с постоянной скоростью $t \in [t_1, t_2]$ и участок торможения $t \in [t_2, t_3]$.

В простейшем случае, ускорение разгона и торможения можно считать постоянными, а постоянную скорость близкой к максимальной скорости и назвать ее номинальной скоростью:

$$v(t) = \begin{cases} v_{nom} \frac{t - t_0}{t_1 - t_0}, & t_0 \leq t \leq t_1 \\ v_{nom}, & t_1 \leq t \leq t_2, \\ v_{nom} \frac{t - t_3}{t_2 - t_3}, & t_2 \leq t \leq t_3 \end{cases} \quad (3.2)$$

где v_{nom} – номинальная скорость схвата манипулятора. Недостатком алгоритма (3.2) следует считать наличие скачков ускорения в моменты t_0, t_1, t_2, t_3 , которые трудно реализовать, и которые губительны для механических элементов манипулятора.

Примером алгоритма движения без скачков ускорения может служить следующая зависимость скорости от времени:

$$v(t) = v_{nom} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi \cdot (t - t_0)}{t_1 - t_0} \right), \quad (3.3)$$

где $t \in [t_0, t_1]$ – текущее время перемещения схвата манипулятора.

Модель движения (3.3) можно усовершенствовать, разбив временной интервал перемещения на три участка, аналогично алгоритму (3.2), учитывая при этом допустимую величину ускорения и торможения.

3.3. Полиномиальная интерполяция зависимости координаты манипулятора от времени

Применение полиномиальной зависимости в алгоритме управления манипулятором позволяет обеспечить плавное начало и конец перемещение манипулятора между исходной и конечной точкой траектории [7,26]. Применение полинома пятой степени позволяет обеспечить равенство нулю скорости и ускорения на границах траектории:

$$q(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5. \quad (3.4)$$

Граничные условия имеют следующий вид:

$$q(t_0) = q^0, \quad q(t_1) = q^1, \quad \dot{q}(t_0) = 0, \quad \dot{q}(t_1) = 0, \quad \ddot{q}(t_0) = 0, \quad \ddot{q}(t_1) = 0. \quad (3.5)$$

Введение обозначений $t_0 = 0, t_1 = T$, соответствующих локальному отсчету времени при движении по траектории $q(t)$, позволяет упростить вид системы уравнений для определения коэффициентов формулы (3.4). Применение граничных условий (3.5) к формуле (3.4) позволяет получить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} a_0 = q^0 \\ a_1 = 0 \\ a_2 = 0 \\ a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 + a_5T^5 = q^1 \\ a_1 + 2a_2T + 3a_3T^2 + 4a_4T^3 + 5a_5T^4 = 0 \\ 2a_2 + 6a_3T + 12a_4T^2 + 20a_5T^3 = 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Система уравнений (3.6) имеет аналитическое решение:

$$\begin{cases} a_0 = q^0 \\ a_1 = 0 \\ a_2 = 0 \\ a_3 = (q^1 - q^0) \frac{10}{T^3} \\ a_4 = -(q^1 - q^0) \frac{15}{T^4} \\ a_5 = (q^1 - q^0) \frac{6}{T^5} \end{cases} . \quad (3.7)$$

Полученный результат показывает, что любую сложную траекторию перемещения манипулятора можно разбить на участки по точкам временной остановки и для каждого участка оперативно построить полином (3.4) и (3.7) для алгоритма управления манипулятора.

3.4. Обход последовательности точек с использованием кубической сплайн интерполяции

Сложная траектория движения манипулятора строится с целью учета рельефа обрабатываемой поверхности и кинематической схемы манипулятора [7,26]. Траектория движения манипулятора может задаваться в виде последовательности точек, заданных в обобщенных координатах манипулятора:

$$q(t_i) = q_i,$$

где $i = 0..n$ – номер точки траектории. Кроме того, задаются величины скорости и ускорения на концах траектории:

$$\begin{aligned} \dot{q}(t_0) = \dot{q}_0 = a, & \quad \dot{q}(t_n) = \dot{q}_n = b, \\ \ddot{q}(t_0) = \ddot{q}_0 = c, & \quad \ddot{q}(t_n) = \ddot{q}_n = d. \end{aligned}$$

Типичная задача планирования движения манипулятора предусматривает гладкость движения в промежуточных точках траектории $q(t)$, то есть непрерывности по скорости и ускорению. Использование

глобальной интерполяции одним многочленом для всех точек траектории приводит к необходимости построения многочлена n -ной с использованием громоздких алгоритмов вычисления коэффициентов этого многочлена.

Интерполяция траектории манипулятора с помощью кубических сплайнов представляет собой алгоритм формирования для каждого временного интервала между смежными точками траектории полинома третьей степени:

$$q_i(t) = a_i + b_i t + c_i t^2 + d_i t^3, \quad (3.8)$$

где $i = 0..n-1$ – номер интервала траектории, $t \in [t_i, t_{i+1}]$ – временной интервал сплайна $q_i(t)$. Коэффициенты сплайнов $q_i(t)$ вычисляются по множеству узловых точек $\{(t_i, q_i)\}_{i=0..n}$ с использованием равенства значений координат, скоростей и ускорений манипулятора в узловых точках.

Сплайн-интерполяция может иметь относительно большое количество узловых точек и не требует проведения длительных и сложных вычислений.

Однако, кубическая сплайн-интерполяция имеет недостаток: чередование значений интерполируемой функции типа «рост-падение-рост» или «падение-рост-падение» для смежных узловых точек приводит к появлению между узлами выбросов интерполирующей функции. Кроме того, необходим постоянный контроль нахождения планируемых скоростей и ускорений манипулятора в интервалах допустимых значений.

4. Управление манипулятором в пространстве координат схвата

Координаты схвата (инструмента) являются в процессе управления целевыми, а обобщенные координаты звеньев и сочленений – промежуточными. Зная заданное очередное положение схвата необходимо вычислить обеспечивающие его перемещение обобщенные координаты звеньев и сочленений.

4.1. Управление по положению схвата

Положение и ориентация схвата (инструмента) описывается шестимерным вектором [7,8]. Зависимость траектории схвата зададим в виде соотношения:

$$s = s^*(t).$$

Решение обратной позиционной задачи позволяет получить программную траекторию в пространстве обобщенных координат:

$$q^*(t) = f^{-1}(s^*(t)).$$

Полученное соотношение является искомым решением задачи управления по положению. Однако, в случае работы в масштабе реального времени, решение данной задачи можно без особых затруднений реализовать для систем, которые имеют аналитическое решение. В случае сложной конфигурации манипулятора, когда аналитического решения не существует, необходимо либо применять быстродействующие вычислители, либо путем применения подготовленных заранее интерполяционных функций решения обратной задачи $s_k = s^*(t_k)$ и $q_k = q^*(t_k)$ для ускоренного вычисления траектории.

Точность управления в случае применения интерполяционной методики будет зависеть от пространственного периода узлов интерполяции. Если планирование траектории манипулятора осуществляется на подготовительном этапе, а не реальном времени, то интерполяционные решения могут быть уточнены.

4.2. Формирование программной траектории схвата

Программная траектория схвата в декартовом пространстве должна определить перемещение схвата за время τ из начальной точки T_0 в конечную точку T_1 [7,8].

$$T_0 = \begin{pmatrix} R_0 & p_0 \\ 000 & 1 \end{pmatrix}, \quad T_k = \begin{pmatrix} R_k & p_k \\ 000 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4.1)$$

Требуется построить непрерывную траекторию схвата с учетом заданных требований:

$$T(t) = T_0 A(n, \delta(t), p(t)), \quad (4.2)$$

где n – вектор, вокруг которого осуществляется поворот схвата, совмещающий системы координат, заданные матрицами R_0 и R_1 , $\delta(t)$ – угол поворота, $p(t)$ – вектор смещения начала систем координат схвата в начальной и конечной точке.

Используя формулы (4.1) и (4.2) выразим матрицу A :

$$A(t) = T_0^{-1} T(t) = \begin{pmatrix} R(t) & p(t) \\ 000 & 1 \end{pmatrix}..$$

Значения матрицы A в начальный и конечный моменты времени равны:

$$A(t_0) = E, \quad A(t_0 + \tau) = T_0^{-1} T_k.$$

Элементы матрицы A в начальный и конечный моменты времени равны:

$$\begin{aligned} R(t_0) &= E, & R(t_0 + \tau) &= R_0^{-1} R_k, \\ p(t_0) &= 0, & p(t_0 + \tau) &= R_0^{-1} (p_k - p_0). \end{aligned}$$

Введем обозначение:

$$R(t_0 + \tau) = R_0^{-1} R_k = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}.$$

Угол поворота и вектор, вокруг которого осуществляется поворот:

$$\begin{aligned} \delta(t_0 + \tau) &= \arccos\left(\frac{r_{11} + r_{22} + r_{33} - 1}{2}\right), \\ n &= \frac{1}{2\sin(\delta(t_0 + \tau))} (r_{32} - r_{23}, r_{13} - r_{31}, r_{21} - r_{12})^T. \end{aligned}$$

Матрица поворота схвата имеет вид:

$$R(t) = \cos(\delta(t))E + (1 - \cos(\delta(t)))n \cdot n^T + \sin(\delta(t)) \begin{pmatrix} 0 & -n_3 & n_2 \\ n_3 & 0 & -n_1 \\ -n_2 & n_1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Функции движения схвата $\delta(t)$ и $p(t)$ выбирают при планировании траектории исходя из кинематической схемы манипулятора и граничных условий по скорости и ускорению.

4.3. Линеаризованный позиционный алгоритм управления

Сформировать управляющие сигналы можно без решения обратной позиционной задачи можно путем применения алгоритма линеаризации функциональной связи положения схвата и обобщенными координатами элементов манипулятора [7]. Алгоритм дает приближенное решение,

поэтому он должен применяться рекуррентно для цепи небольших последовательных перемещений.

Исходным соотношением является функция связи координат схвата s^* и обобщенных координат q , которая является решением прямой позиционной задачи:

$$s^* = f(q).$$

Рассматривая эту функцию как нелинейное уравнение и используя соответствующий алгоритм Ньютона, получим интерполяционную зависимость последовательности последовательных приближений решения:

$$\Delta q_{k+1} = J^{-1}(q_k) \cdot \Delta s_k, \quad (4.3)$$

$$\Delta q_{k+1} = q_{k+1} - q_k,$$

$$\Delta s_k = (\Delta \varphi_k, \Delta p_k) = (\omega_k \Delta t, v_k \Delta t),$$

где Δs_k – вектор перемещения схвата на k -том шаге итерации за время Δt путем поворота схвата с угловой скоростью ω_k и смещения с линейной скоростью v_k , $J(q)$ – матрица Якоби, состоящая из производных функции $f(q)$ по координатам q .

Детализация приращений вектора смещения и угла поворота имеет вид:

$$\Delta p_k = p^* - p_k,$$

$$\Delta \varphi_k = \frac{1}{2} (x_k \times x^* + y_k \times y^* + z_k \times z^*).$$

Таким образом, целевое положение схвата описывается матрицей:

$$T^*(t) = \begin{pmatrix} x^*(t) & y^*(t) & z^*(t) & p^*(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

На основе соотношения (4.3) можно составить схему системы управления положением схвата манипулятора, которая приведена на рис.4.1.

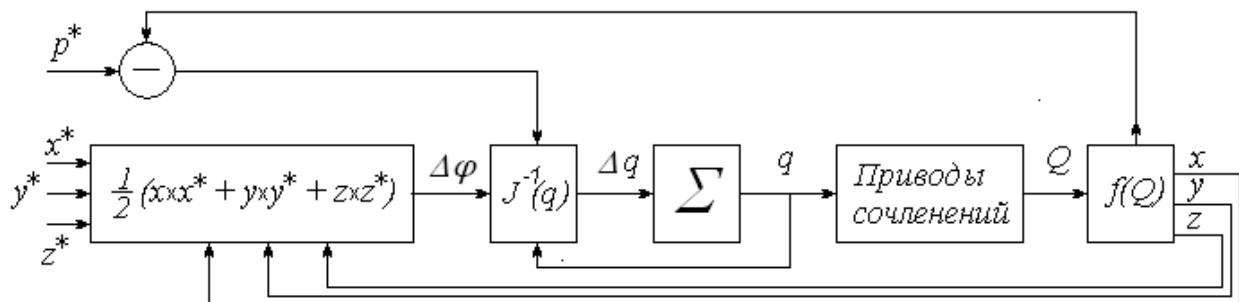


Рис.4.1. Схема линейризованной системы управления положением схвата

Векторная величина Q – это вектор показаний датчиков состояния сочленений. Схема содержит контуры обратных связей по текущему положению схвата и по величине смещения относительно целевой точки.

4.4. Управления по вектору скорости и по вектору ускорения

Вектор обобщенной скорости схвата, включающий векторы угловой и линейной скорости имеет следующий вид:

$$\dot{s}(t) = \begin{pmatrix} \omega(t) \\ v(t) \end{pmatrix}.$$

Управление по вектору скорости схвата – это управление, при котором обеспечивается (приблизительное) совпадение текущей и командной (целевой) обобщенной скорости [7]:

$$\dot{s}(t) \approx \dot{s}^*(t) = \begin{pmatrix} \omega^*(t) \\ v^*(t) \end{pmatrix}.$$

Описываемый способ управления обычно используется при управлении манипулятором от рукоятки, которую перемещает оператор, и которая имеет аналогичные звенья и сочленения.

Дифференцируя формулу (4.3) по времени получим следующее соотношение для скоростей звеньев манипулятора и схвата:

$$\dot{q}^*(t) = J^{-1}(q^*) \cdot \dot{s}^*(t). \quad (4.4)$$

Полученная формула (4.4) является аналитическим выражением закона управления по скорости для манипулятора и может быть отображена в виде схемы (рис.4.2).

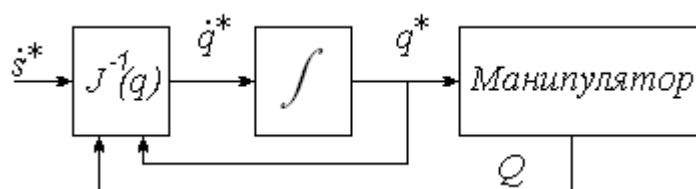


Рис.4.2. Схема контура управления манипулятором по скорости схвата

Элементы обратной матрицы Якоби зависят от программных значений управления, но более эффективно управлять, используя показания датчиков, как показано на схеме.

Управление по вектору ускорения схвата – это управление, при котором обеспечивается (приблизительное) совпадение текущего и командного (целевого) обобщенного ускорения, то есть должны быть близки следующие вектора:

$$\ddot{s}(t) = \begin{pmatrix} \dot{\omega}(t) \\ \dot{v}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon(t) \\ \alpha(t) \end{pmatrix} \text{ и } \ddot{s}^*(t) = \begin{pmatrix} \dot{\omega}^*(t) \\ \dot{v}^*(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon^*(t) \\ \alpha^*(t) \end{pmatrix}.$$

Дифференцирование обеих частей известного [7] равенства связи вектора скорости схвата и обобщенного вектора скорости звеньев манипулятора:

$$\dot{s} = J(q) \cdot \dot{q}$$

позволяет получить следующее выражение:

$$\ddot{s} = J(q) \cdot \ddot{q} + \dot{J}(q) \cdot \dot{q}.$$

Сформированное выражение позволяет выразить обобщенный вектор ускорения для звеньев манипулятора:

$$\ddot{q} = J^{-1}(q) \cdot \ddot{s} - J^{-1}(q) \cdot \dot{J}(q) \cdot \dot{q}.$$

Полученная формула лежит в основе схемы контура управления манипулятора по обобщенному вектору ускорения схвата (рис.4.3).

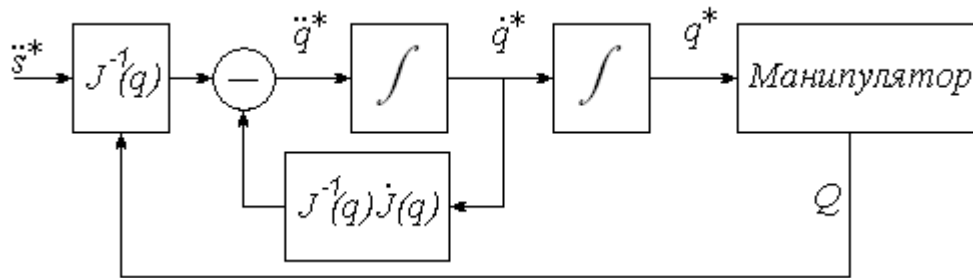


Рис.4.3. Схема контура управления манипулятором по ускорению схвата

В схеме на рис.4.3 в состав сигналов связи необходимо включать данные от датчиков скорости и ускорения.

4.5. Управление по вектору силы

Управление по вектору силы подразумевает, что схват (инструмент) должен создавать заданные силы и моменты. Подвижные сочленения, создавая свои силы и моменты с помощью своих приводов, в итоге определяют силы и моменты схвата (инструмента). Очевидно, что силы и моменты возникают при взаимодействии схвата с перемещаемыми или обрабатываемыми объектами.

Обобщенная сила, приложенная к схвату, может быть обозначена следующим образом:

$$F = \begin{pmatrix} \tau \\ f \end{pmatrix},$$

где τ – вектор момента, f – вектор силы.

Обобщенная сила схвата N -звенного манипулятора складывается из моментов и сил подвижных сочленений $M = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)^T$. Связь между обобщенной силой F и вектором M целесообразно получить на основе *принципа виртуальных перемещений*: в положении равновесия сумма элементарных работ всех активных сил при возможных перемещениях равна нулю. Применительно к манипулятору принцип виртуальных перемещений выражается следующей формулой:

$$\begin{aligned} \mu_1 \delta q_1 + \mu_2 \delta q_2 + \dots + \mu_N \delta q_N = \\ = \tau_x \delta \varphi_x + \tau_y \delta \varphi_y + \tau_z \delta \varphi_z + f_x \delta x + f_y \delta y + f_z \delta z \end{aligned} \quad (4.5)$$

Соотношение (4.5) можно представить в векторном виде:

$$M^T \delta q = F^T \delta s.$$

Поскольку $\delta s = J(q) \delta q$, то $M^T \delta q = F^T J(q) \delta q$.

Сокращение общего множителя δq и транспонирование в приведенной выше формуле позволяют получить окончательное выражение для связи обобщенной силой F и вектором M :

$$M = FJ(q). \quad (4.6)$$

Полученная зависимость позволяет по заданной силе и моментам, которую схват должен прикладывать к объекту, можно вычислить все моменты и силы, которые должны обеспечивать приводы манипулятора. Вычисление обратной матрицы Якоби, позволяет вычислить обобщенный вектор силы, создаваемой захватом (инструментом).

4.6. Планирование траектории с помощью частотной фильтрации на основе двумерного преобразования Фурье

Одной из сложных задач по управлению манипуляторами является задача перемещения инструмента манипулятора [11] по заданной траектории над обрабатываемой поверхностью. Перемещение пера

осуществляется по точкам контура, образующим траекторию. Устройства данного типа позволяют создавать контурные изображения, являющиеся частными случаям векторных изображений. Технология трехмерного послойного создания объектов термопластичными массами базируется на последовательном формировании контуров, характеризуемыми не только формой, но и толщиной образующей пластикой нити. Контурная составляющая изображения заключает в себе важную информацию, которая во многих случаях анализа изображения является основной [11,12]. Границы объектов изображения и внутренние элементы объектов представляют собой контуры.

Производительность графопостроителей определяется скоростью и ускорением перемещения рисующего пера. Задача перемещения пера графопостроителя должна решаться с учетом физических возможностей приводов графического манипулятора [11]. Первичными ограничениями приводов являются ограничения по скорости и ускорению перемещаемого пера. В случае применения шаговых двигателей, превышение ограничений по скорости приводит к пропуску шагов, что создает ошибки позиционирования. Превышение ограничений по ускорению вызывает механические перегрузки приводов, которые могут привести к их деформации или поломке.

Математическая модель траектории представляет собой контур, состоящий из конечной последовательности попарно прилегающих точек. Математическим представлением контура является матрица C , имеющая число столбцов, равное числу точек M , образующих контур. Матрица C имеет две строки, первая из которых соответствует последовательности координат x , а вторая - y :

$$C = \begin{pmatrix} x_0 & x_1 & \dots & x_{M-1} \\ y_0 & y_1 & \dots & y_{M-1} \end{pmatrix}.$$

Матрицу C целесообразно преобразовать в вектор $Z = (z_0 \ z_1 \ \dots \ z_{M-1})^T$ путем перехода в комплексную плоскость за счет объединения координат каждой точки в комплексное число [11,12], соответствующее компоненте вектора Z . Представление точек контура в виде функции комплексного переменного имеет вид:

$$z_j = x_j + i \cdot y_j,$$

где $j = 0..M-1$, константа $i = \sqrt{-1}$ - мнимая единица.

Конечной последовательности элементов вектора Z можно сопоставить конечную последовательность ее дискретного образа Фурье. Образ дискретного преобразования Фурье $F = (F_0 \ F_1 \ \dots \ F_{M-1})^T$ вычисляется по множеству упорядоченных точек контура следующим образом:

$$F_k = \sum_{j=0}^{M-1} z_j \exp\left(-i \frac{2\pi}{M} k \cdot j\right), \quad (4.7)$$

где $k = 0..M-1$. Гармоники конечного образа Фурье цикличны и попарно соответствуют одинаковым частотам. Например, первыми гармониками являются гармоники $F_1 = \sum_{j=0}^{M-1} z_j \exp\left(-i \frac{2\pi}{M} j\right)$ и $F_{M-1} = \sum_{j=0}^{M-1} z_j \exp\left(-i \frac{2\pi}{M} j(M-1)\right)$.

Восстановить контур Z по образу F позволяет обратное дискретное преобразование Фурье:

$$Z(j) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} F(k) \exp\left(i \frac{2\pi}{M} k \cdot j\right).$$

Обратное преобразование дискретного образа Фурье можно реализовать, используя усечение [11], то есть оставить первые n пар низкочастотных гармоник, а остальные обнулить. Усеченное обратное дискретное преобразование Фурье позволяет по образу исходного контура F получить аппроксимированный n низкочастотными гармониками контур, которые в пространстве комплексных чисел образуют вектор Z^A :

$$Z^A(j, n) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^n F^A(k, n) \exp\left(i \frac{2\pi}{M} k \cdot j\right) + \frac{1}{M} \sum_{k=M-n}^{M-1} F^A(k, n) \exp\left(i \frac{2\pi}{M} k \cdot j\right). \quad (4.8)$$

Матрица координат точек аппроксимирующего контура образуется действительными и мнимыми частями элементов последовательности (4.8):

$$C^A = \begin{pmatrix} \operatorname{Re}(Z^A(0, n)) & \operatorname{Re}(Z^A(1, n)) & \dots & \operatorname{Re}(Z^A(M-1, n)) \\ \operatorname{Im}(Z^A(0, n)) & \operatorname{Im}(Z^A(1, n)) & \dots & \operatorname{Im}(Z^A(M-1, n)) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0^A & x_1^A & \dots & x_{M-1}^A \\ y_0^A & y_1^A & \dots & y_{M-1}^A \end{pmatrix}. \quad (4.9)$$

Ошибка аппроксимации может быть определена как сумма множества исключенных из спектра высокочастотных гармоник:

$$Z^D(j, n) = \frac{1}{M} \sum_{k=n+1}^{M-n-1} f_k \exp\left(i \frac{2\pi}{M} k \cdot j\right).$$

Модуль величины $Z^D(j, n)$ равен расстоянию между j -ми точками исходного и аппроксимирующего контуров. Исключение высокочастотных гармоник в процессе аппроксимации контура является процессом фильтрации и проявляется в сглаживании изломов исходного контура.

Численный эксперимент по аппроксимации траектории фильтрующим дискретным преобразованием Фурье был реализован для контура, изображенного на рис.1. Выбранный контур является несимметричным, состоит из 435 точек и имеет 12 изломов. Вычисления по формулам (4.7)-(4.9) проведены для двух значений числа пар гармоник взятых для аппроксимации. Результаты аппроксимации в виде наложения исходного C и аппроксимирующего C^A контуров приведены на рис.4.4. Точки исходного контура расположены в узлах сетки с постоянным шагом. Визуальное сравнение исходного и аппроксимирующих контуров позволяет качественно оценить скорость сходимости усеченного ряда (4.8).

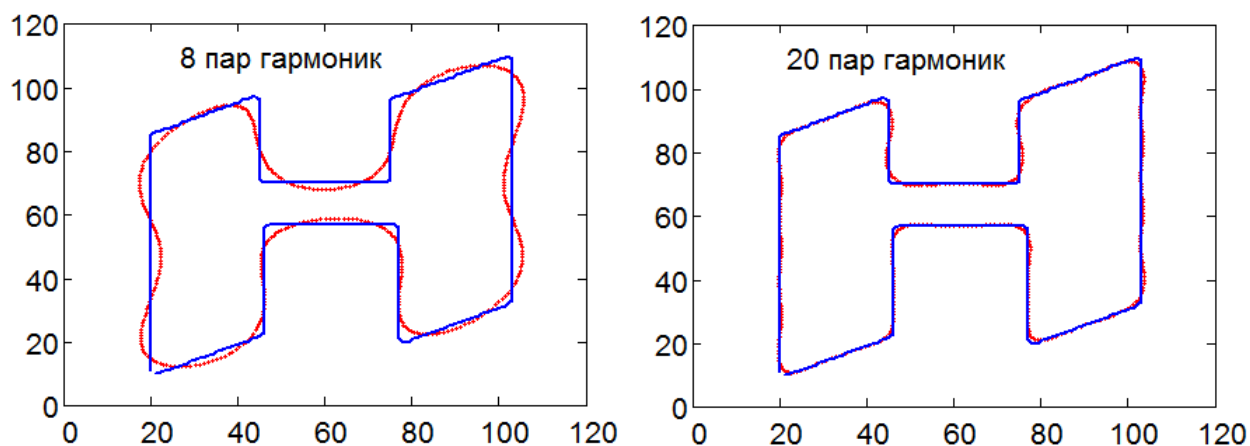


Рис.4.4. Аппроксимация контура из 435 точек 8-ю и 20-ю парами гармоник

В последующих вычислениях предполагается, что аппроксимирующий контур построен по 20 парам гармоник, а время перемещения из любой узловой точки в соседнюю точку является величиной постоянной и равной Δt , что обеспечивает неизменность временных затрат на процесс построения контура. В этом случае зависимость изменения координат точки, движущейся по аппроксимирующему контуру, имеет вид, представленный на рис.4.5. Горизонтальная ось отображает время, измеряемое в тактах перемещения между узловыми точками контура.

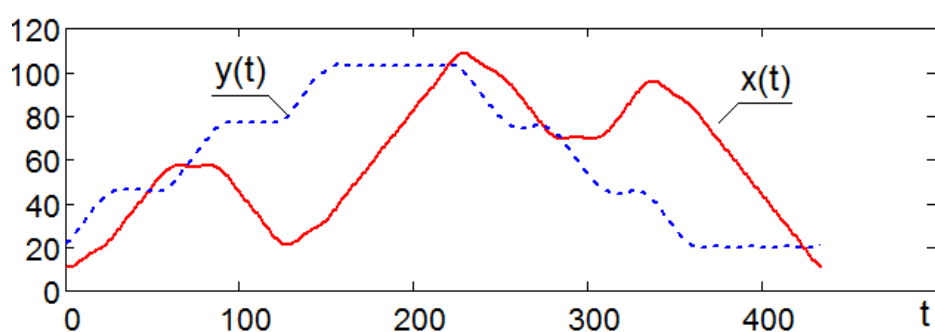


Рис.4.5. Зависимость координат пера от номера шага обхода точек
сглаженного контура

Компоненты векторов скорости V и ускорения A перемещения пера по исходному и аппроксимирующему контурам были вычислены по соответствующим разностным рекуррентным соотношениям:

$$\begin{aligned} Vx_j &= (x_j - x_{j-1})/\Delta t, & Vy_j &= (y_j - y_{j-1})/\Delta t, \\ Vx_j^A &= (x_j^A - x_{j-1}^A)/\Delta t, & Vy_j^A &= (y_j^A - y_{j-1}^A)/\Delta t, \\ Ax_j &= (Vx_j - Vx_{j-1})/\Delta t, & Ay_j &= (Vy_j - Vy_{j-1})/\Delta t, \\ Ax_j^A &= (Vx_j^A - Vx_{j-1}^A)/\Delta t, & Ay_j^A &= (Vy_j^A - Vy_{j-1}^A)/\Delta t. \end{aligned}$$

Результаты вычислений скоростей и ускорений перемещения графического пера по исходному и аппроксимирующим контурам для 100 тактов времени приведены в виде графиков на рис.4.6 и рис.4.7. Характерным отличием изменения скоростей и ускорений движения по исходному и аппроксимирующему контурам является скачкообразное изменение этих параметров для движения по исходному контуру и плавные их изменения - по аппроксимирующему контуру. Кроме того, максимальные значения ускорения для рассмотренного примера при движении по исходному контуру примерно в 6 раз больше чем при движении по аппроксимирующему контуру.

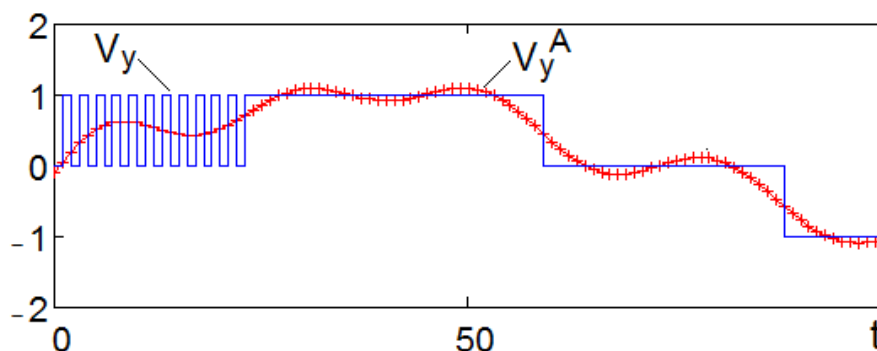


Рис.4.6. Графики изменения скоростей движения пера по исходному и аппроксимирующему контурам

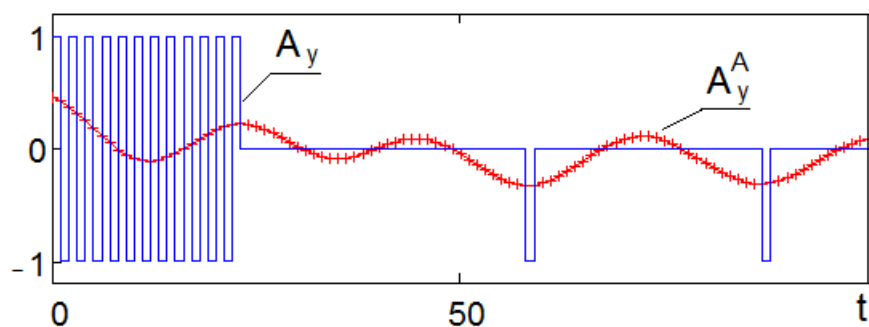


Рис.4.7. Графики изменения ускорений движения пера по исходному и аппроксимирующему контурам. Размах графика A_y^C увеличен в 3 раза

Причина скачкообразных изменений скорости и ускорения, при движении пера по исходному контуру, заключена в периодической остановке пера по одной из координат. Фрагменты исходного и аппроксимирующего контуров, состоящие из первых 10 и последних 6 точек, показаны на рис.4.8. Рисунок позволяет увидеть, что между парами точек (1,2) и (3,4) перо не двигалось по оси Y , а между точками (2,3) перо было перемещено вдоль этой оси, что соответствует первому скачку скорости и ускорений, показанным на предыдущих рисунках.

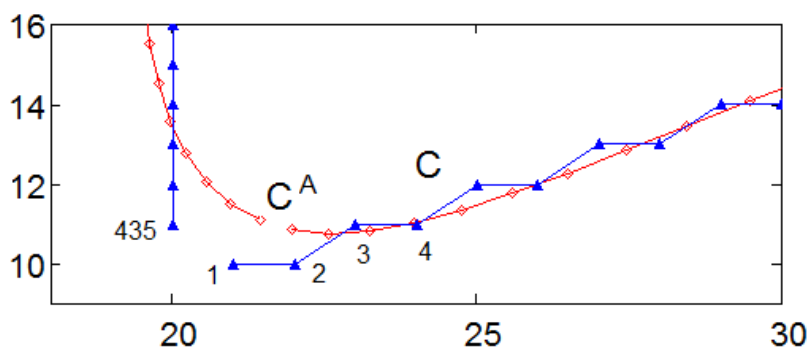


Рис.4.8. Точки исходного и аппроксимирующего контуров

Множество величин отклонений аппроксимирующего контура от исходного контура представлено в виде точечного графика на рис.4.9. Максимальное отклонение по координатам для рассмотренного примера с 20 парами гармоник усеченного ряда (4.8) не превысило 2 единицы, а среднеквадратическое отклонение составило 0.3.

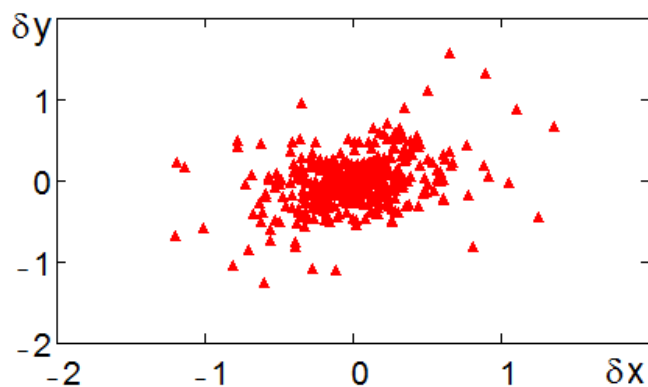


Рис.4.9. Отклонения аппроксимирующего контура от исходного контура

Результаты численного эксперимента позволяют сделать следующие выводы:

1. Движение пера в соответствии с заданной последовательностью точек контура в точках излома траектории сопровождается вариациями ускорения, аналогичными ударным воздействиям на механизм перемещения пера.
2. Применение аппроксимации траектории движения пера целесообразно для ограничения роста величин ускорений в изломах линий, образующих контур. При этом время, затрачиваемое на процесс построения контура, не изменяется.
3. Аппроксимация траектории фильтрующим дискретным преобразованием Фурье позволяет ограничить величину максимального ускорения пера графопостроителя без существенных потерь качества формируемого контура.

Литература

1. Сачко Н.С. Организация и оперативное управление машиностроительным производством: учебник.,- Мн.: «Новое знание», 2008, - 640 с.
2. Туровец. О.Г. Организация производства и управление предприятием .- М.: ИНФРА-М, 2011 , 528 стр.
3. Новицкий Н.И. Организация производства: учебное пособие/Н.И. Новицкий, А.А. Горюшкин; под ред. Н.И. Новицкого. – М.: КНОРУС, 2010.-352 с.
4. Дж. Лайкер., Дао Toyota. 14 принципов менеджмента ведущей компании мира.-М.: Альпина паблишер, 2011 – 400 с.
5. Ильин А.И. Планирование на предприятии: учеб. пособие/А.И. Ильин.-7-е изд., испр. и доп. - Мн.: Новое знание, 2006.-668 с.
6. Сеница Л.М. Организация производства: Учеб. Пособие. – Мн.: УП «ИВЦ Минфина», 2008, 536 с.
7. Зенкевич С.Л. Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004. – 480 с.
8. Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А., Методы управления робототехническими приложениями. Учебное пособие. — СПб.: Университет ИТМО, 2016. — 108 с.
9. Шаньгин Е.С. Управление роботами и робототехническими системами. Уфа. 2005. 196 с. Уфа Уфим. гос. авиац. техн. ун-т 2005 Уфа РИК УГАТУ 188 с
10. Климчик А.С. и др. Разработка управляющих программ промышленных роботов. Минск 2008. 131 с.
11. Капля В.И., Бойцов Е.А., Пан А.Г. Оценка динамических параметров движения пера графического манипулятора при аппроксимации траектории низкочастотными дискретными гармониками. //Научное обозрение. 2015. №10-1. с.55-60
12. Фурман А.Я., Кревецкий А.В., Передреев А.К. и др. Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 592 с.
13. Пуриш В.З. Основы андроматики. Проектирование роботов- андроидов. Книга 2 / Перевод с укр. В.З. Пуриш. – Николаев: Изд-во ЧГУ им. Петра Могилы, 2010. – 312 с

14. Управление манипулятором с помощью обучения с подкреплением Н. П. Кошманова, Д. С. Трифонов, В. Е. Павловский // Нелинейная динамика. 2012. Т. 8. № 4 (Мобильные роботы). С. 689–704.
15. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника.-М.: Мир, 1989.-624 с.
16. Шахинпур М. Курс робототехники.-М.: Мир, 1990.-527 с.
17. Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора.-М.: Наука, 1976.-104 с.
18. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В девяти книгах.-М.: Наука, 1986.
19. Справочник по промышленной робототехнике. В двух книгах. -М.: Машиностроение. 1989.
20. Бурдаков С.Ф., Дьяченко В.А., Тимофеев А.Н. Проектирование манипуляторов, промышленных роботов и роботизированных комплексов. Учебное пособие.-М.: Высш.школа, 1986.-264 с.
Аншин С.С., Бабич А.В. и др. Проектирование и разработка промышленных роботов. – М.: Машиностроение, 1989.
21. Бурдаков С.Ф., Дьяченко В.А. и др. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов: Учебное пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1986.
22. Козловский М.З., Слоущ А.В. Основы динамики промышленных роботов. – М.: Наука, 1988. – 240 с.
23. Козырев Б.Г. Промышленные роботы: Справочник. – Изд. 2-е, пер. и испр. – М.: Машиностроение, 1988.
24. Костюк В.И., Гавриш А.П. и др. Промышленные роботы. Конструирование, управление, эксплуатация. – К.: Высш. шк., 1985.
25. Кулаков Ф.М. Супервизорное управление манипуляционными роботами. – М.: Наука, 1980.
26. Sciavicco L., Siciliano B. Modelling and Control of Robot Manipulators (Second Edition). Springer-Verlag London/ 2000. 390 p.

Электронное учебное издание

Виктор Иванович **Капля**
Егор Викторович **Капля**

**ОПЕРАТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ**

Учебное пособие

Электронное издание сетевого распространения

Редактор Н.И. Матвеева

Темплан 2017 г. Поз. № 42.

Подписано к использованию 26.12.2017 г. Формат 60×84 1/16.

Гарнитура Times. Усл. печ. л. 3,38.

Волгоградский государственный технический университет
400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.

ВПИ (филиал) ВолгГТУ.
404121, г. Волжский, ул. Энгельса, 42а.