

На правах рукописи

МАМАЕВ Ильшат Ринатович

**УПРАВЛЕНИЕ
И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ
ОБЪЕКТОВ ИЗ КОНТЕЙНЕРА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ RMD-ТЕХНОЛОГИИ**

**Специальность 05.13.01
Системный анализ, управление и обработка информации
(в промышленности)**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2010

Работа выполнена на кафедре вычислительной математики и кибернетики
ГОУ ВПО « Уфимский государственный авиационный технический университет»

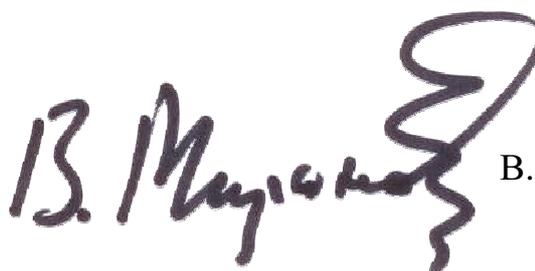
Научный руководитель	д-р техн. наук, проф. ЮСУПОВА Нафиса Исламовна
Официальные оппоненты	д-р техн. наук, проф. ВАЛЕЕВ Сагит Сабитович, Уфимский государственный авиационный технический университет
	канд. техн. наук, доц. ПОГОРЕЛОВ Григорий Иванович, ФГУП «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния»
Ведущая организация	Институт механики Уфимского научного центра РАН

Защита диссертации состоится «23» декабря 2010 г. в 10 часов
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03
при Уфимском государственном авиационном техническом университете
по адресу: 450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан « » _____ 2010 г .

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, проф.



В. В. Миронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одними из основных задач промышленных роботов на сегодняшний день являются операции сборки, захвата и перемещения объектов, причем манипуляторы в большинстве случаев выполняют действия в условиях известной формы, положения и ориентации объектов. Роботизированная система без сенсорной подсистемы может быть использована только для заранее запрограммированных и повторяющихся задач. Таким образом, существует необходимость в разработке эффективных и гибких роботизированных комплексов, которые позволяют распознавать сложные и неорганизованные объекты с минимальным или без априорного знания о позиции и геометрии объектов.

Задача извлечения объектов из контейнера — задача автоматического разбора неотсортированных объектов с помощью манипулятора. Это очень распространенная задача во всех видах промышленности, где требуется отделить одну деталь от множества других.

Исследования, посвященные аспектам решения задачи автоматического извлечения объектов из контейнера в таких областях, как системный анализ, робототехника, компьютерная графика и автоматизация производства можно найти в работах отечественных и зарубежных ученых (Ю. Г. Козырев, П. Д. Крутько, А. Ф. Кулаков, А. В. Тимофеев, В. И. Васильев, Б. Г. Ильясов, А. Как и J. Edwards, K. Rahardja и A. Kosaka, K. Ikeuchi, O. Ghita, P. Whelan, H. Woern и другие). Но, тем не менее, несмотря на десятилетия исследований, данная проблема остается открытой. В современном производстве эта задача решается с помощью сложных производственных линий с применением ручного труда. Тем временем, новые сенсорные технологии, значительные увеличения вычислительной мощности компьютеров, новые алгоритмы и современные инженерные разработки позволяют предлагать новые подходы к решению проблем автоматизации промышленности.

Данная работа посвящена решению задачи автоматического извлечения объектов из контейнера с использованием PMD (Photonic Mixer Device) технологии.

Цель работы

Разработка методов обработки информации и решение задачи управления с помощью системы автоматического извлечения объектов из контейнера с использованием PMD-технологий.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

1. Провести системный анализ задачи извлечения объектов из контейнера, рассмотреть существующие подходы и оценить эффективность использования PMD-технологии;

2. Разработать метод обработки информации на основе специального математического обеспечения для управления извлечением объектов из контейнера на основе PMD-технологии;

3. Разработать специальное математическое и программное обеспечение для метода реконструкции трехмерной сцены по полученным данным от PMD-камеры, разрабатываемый метод должен учитывать особенности PMD технологии и задачи автоматического извлечения объектов из контейнера;

4. Разработать функциональную модель системы извлечения объектов из контейнера PMD-технологии, алгоритм управления и специальное алгоритмическое и программное обеспечение системы автоматического извлечения объектов из контейнера, реализующее предложенные методы;

5. Разработать методику создания и провести испытания экспериментального стенда для решения задачи автоматического извлечения объектов из контейнера. Провести анализ эффективности предложенных методов и подхода в целом. Разработать модели, методы и алгоритмы по результатам стендовых исследований.

Методика исследования

В работе используются основные положения системного анализа и робототехники, применяются методы обработки изображений, оптимизации и теории принятия решений. При разработке программного обеспечения применялись объектно-ориентированный подход, методы геометрического и имитационного моделирования, машинной графики.

Основные научные результаты, выносимые на защиту:

На защиту выносятся:

1. Результаты системного анализа проблемы автоматического извлечения объектов из контейнера, состоящие из анализа существующих подходов, их классификации и оценки эффективности использования PMD-технологии в поставленной задаче.

2. Метод обработки информации PMD-камеры, основанного на адаптированном к PMD-технологии и к поставленной задаче методе определения параметров камеры и на методе обработки данных дальномера с использованием оригинальной математической модели.

3. Метод реконструкции трехмерной сцены по полученным от PMD-камеры данным, позволяющий проводить реконструкцию по нескольким изображениям дальности;

4. Функциональная модель и алгоритм управления, специальное алгоритмическое и программное обеспечение системы автоматического извлечения деталей из контейнера с использованием робота-манипулятора и PMD-технологии, реализующее предложенные методы.

5. Методика создания экспериментального стенда и его описание для решения задачи автоматического извлечения объектов из контейнера и результаты анализа эффективности предложенных методов и системы в целом.

Научная новизна результатов

Новыми являются разработанные и исследованные автором:

1. Новизна проведенного системного анализа заключается в том, что разработана классификация существующих систем, определены достоинства и недостатки существующих подходов к решению задачи автоматического извлечения объектов из контейнера и рассмотрены особенности применения PMD-технологии в поставленной задаче.

2. Метод обработки информации с PMD-камеры, научная новизна которого включает:

- метод определения внутренних и внешних параметров PMD-камеры, который, в отличие от существующих, адаптирован для использования в поставленной задаче, так как позволяет компенсировать низкое разрешение PMD-камеры и учитывает ориентацию камеры относительно шаблона;

- метод обработки данных дальномера. Новизна разработанного метода состоит в том, что представляемая модель учитывает особенности сложного и слабо исследованного процесса отображения данных о расстоянии до объекта PMD-камеры. Предложенный метод позволяет компенсировать недостатки PMD-технологии, что позволило эффективно применить ее в решении поставленной задачи.

3. Новизна разработанного метода реконструкции трехмерной сцены обуславливается новизной технологии, особенности которой учитываются в предлагаемом подходе, что позволяет повысить эффективность решения задачи, а также в том, что представленный метод позволяет проводить реконструкцию сцены по нескольким изображениям. Использование предложенного метода позволило решить проблемы низкого разрешения и малого угла обзора PMD-камер;

4. Новизна предложенной функциональной модели и алгоритма управления заключается в том, что в отличие от известных, они позволяют решать задачу автоматического извлечения объектов из контейнера с использованием PMD-камеры на основе ситуационного подхода. Новизна разработанного алгоритмического обеспечения обуславливается новизной предложенных методов;

5. Новизна методов создания экспериментального стенда и анализа эффективности обусловлена новыми моделями и методами, а также учетом ограничений на операционные характеристики аппаратно-программного комплекса, вытекающими из существа задачи управления.

Практическая значимость

Практическую значимость имеют полученные автором следующие результаты:

1. Разработанное прикладное программное обеспечение на базе языка C++, реализующее предложенный подход к решению задачи с использованием PMD-камеры, который отличается гибкостью и модульной архитектурой позволяет проводить моделирование и анализ эффективности.

2. Разработанный программно-аппаратный комплекс для решения задачи

автоматического извлечения объектов из контейнера с помощью робота-манипулятора и РМД-камеры.

Внедрение и связь исследования с научными программами

Работа выполнена в рамках совместных научных проектов Уфимского государственного авиационного технического университета и Института управляющих вычислительных систем и робототехники технологического института г. Карлсруэ (Германия), поддержанных грантом РФФИ № 06-08-01180-а «Интеллектуальные методы поиска траекторий многозвенных манипуляторов в сложном рабочем пространстве» (2006–2008) и грантом № 16SV2307 Министерства образования Германии.

Основные результаты диссертационной работы используются в виде программного обеспечения в научно-производственной фирме «РД-Технология» и в учебном процессе на кафедре ВМиК УГАТУ.

Разработанный программно-аппаратный комплекс успешно внедрен в систему автоматического извлечения объектов из контейнера фирмы KUKA Robotics – Lynkeus.

Апробация работы и публикации

Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались на:

- IX–X Международных научных конференциях “Компьютерные науки и информационные технологии” (Уфа, 2007; Анталия, Турция, 2008);
- семинарах в Институте управляющих вычислительных систем и робототехники технологического университета Карлсруэ (Германия, 2008, 2009);
- семинарах на кафедре ВМиК УГАТУ;
- ежегодных международных зимних школах аспирантов (Уфа, 2007, 2008).

Результаты работы отражены в публикациях

Основные материалы диссертационной работы опубликованы в 8 статьях, в том числе в 1 статье в рецензируемом журнале из перечня ВАК. Разработанное программное обеспечение защищено свидетельством Роспатента № 2010615109 об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем основной части диссертации составляет 117 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обосновывается актуальность решаемой научной задачи, формулируются цель и задачи исследования, перечисляются подходы и методы решения задач, приводятся результаты, выносимые на защиту, отмечается их научная новизна и практическая значимость.

Приводятся сведения о внедрении результатов, апробации работы и публикациях.

Первая глава посвящена анализу современного состояния проблемы автоматического извлечения объектов из контейнера и ее актуальности.

Проводится анализ задачи автоматического извлечения объектов из контейнера, рассматриваются принципиальные компоненты системы. Исследуются существующие подходы, анализируются их достоинства и недостатки, определяется области их применения. Проводится классификация рассматриваемых систем по типу используемой сенсорной подсистемы.

Проведенный сравнительный анализ различных подходов показал, что на сегодняшний день не существует универсального подхода к решению задачи автоматического извлечения объектов из контейнера, позволяющего эффективно решать поставленную задачу и соответствующего высоким требованиям к промышленным системам. Каждый подход обладает рядом присущих ему недостатков, ограничивающих область его применения, например:

- зависимость от условий освещения, цвета и отражающих свойств объектов (монокулярные и стерео камеры);
- недостаточная скорость получения изображения (лазерные дальнометры);
- высокая сложность и медленная скорость трехмерной реконструкции сцены (стереокамеры, системы DFD);
- недостаточная точность измерений;
- высокая стоимость;
- большие размеры.

Проводится обзор возможностей применения PMD технологии в задаче извлечения объектов из контейнера, рассматриваются ее достоинства и недостатки с точки зрения поставленной задачи.

На основе проведенного анализа формулируются цель и задачи исследования, решаемые в диссертационной работе.

Во второй главе проводится анализ PMD-технологии, выделяются ее достоинства и разрабатываются методы компенсации ее недостатков для возможности эффективного применения PMD-камеры в поставленной задаче.

Вначале описывается математической модель PMD-технологии и ее принцип, который заключается в том, что сравнение полученного оптического сигнала с начальным сигналом непосредственно на пикселе PMD-матрицы позволяет определить сдвиг сигнала по фазе, т.о. определить расстояние за время полета луча.

Проводится анализ возможностей применения PMD-технологии в рамках задачи автоматического извлечения объектов из контейнера. В сравнении с другими, PMD – очень компактная система, которая позволяет получать данные в реальном времени и, благодаря использованию собственных источников света и автоматическому подавлению фонового света, не зависит от условий освещенности.

Проведенный анализ также позволил выявить следующие недостатки PMD-технологии:

- низкое разрешение и малый угол обзора камеры, что осложняет трехмерную реконструкцию сцены и распознавание объектов;
- искажения и ошибки измерения расстояния.

Для компенсации указанных недостатков и для эффективного использования PMD-камеры в задаче автоматического извлечения объектов из контейнера требуется разработать методы обработки информации и реконструкции трехмерной сцены.

Далее рассматривается формальная постановка задачи обработки данных, выделяется 2 подзадачи: определение внутренних и внешних параметров PMD-камеры и обработка данных дальномера PMD-камеры. Анализируются известные методы и подходы.

В качестве особенностей постановки и решения этих задач отмечаются:

- необходимость адаптации метода определения внутренних и внешних параметров с учетом низкого разрешения и малого угла обзора PMD-камеры, а также с учетом задачи автоматического извлечения объектов из контейнера – возможности применения метода непосредственно в процессе решения задачи;
- необходимость разработки метода обработки информации, который посредством компенсации искажений и ошибок измерений позволил бы снизить погрешность PMD-камеры и эффективно использовать ее в рамках поставленной задачи.

Для определения внутренних и внешних параметров PMD-камеры используется модель перспективной проекции камеры-обскуры. Несмотря на то, что проблема определения внутренних и внешних параметров камеры, описываемой моделью камеры-обскуры – хорошо исследованная область, особенности PMD-камеры не позволяют получить хороших результатов при использовании известных методов. Для компенсации низкого разрешения камеры были рассмотрены методы масштабирования изображения и выявлено, что билинейная интерполяция позволяет получать хорошие результаты. Таким образом был предложен метод, который проводит предварительное масштабирование изображений.

Другим важным фактором является то, что определение параметров проводится посредством сопоставления точек в плоскости изображения с абсолютными и важную роль играет ориентация реального шаблона в пространстве. Для возможности применения разрабатываемого метода непосредственно в процесс решения задачи автоматического извлечения объектов из контейнера необходимо разработать метод определения ориентации шаблона в пространстве.

Предложенный метод использует специальные метки в центре доски – круги инвертированного по отношению к клетке цвета. Алгоритм состоит в следующем: сначала определяется расположение кругов на доске, потом рассчитывается их взаимное расположение и определяются 2 базовых вектора, которые задают координатную плоскость на доске. Далее определяются

квадранты, в которых находятся 4 угловые точки доски, после чего можно определить какая из 4 возможных ориентаций на данной фотографии и правильно отсортировать найденные точки пересечения.

Помимо определения внутренних и внешних параметров камеры, требуется также обработка данных дальномера PMD камеры. Анализ PMD-технологии выявил, что в данные о дальности вносятся искажения следующими источниками:

- периодические ошибки: причина заключается в том, что расчет расстояния основывается на предположении, что модулированный сигнал является идеальным синусоидальным, что не соответствует реальности на практике;
- ошибки, возникающие из-за задержки при передаче сигнала с сенсора (пикселя матрицы) на процессор. Ошибка зависит от относительного расположения пикселя внутри матрицы;
- ошибки, возникающие из-за интенсивности (яркости) оптического сигнала, так как расчет дальности зависит от количества отраженного света. В случае слабой интенсивности сигнала, ухудшается отношение сигнал-шум, что вносит случайную ошибку в измерения. В противоположном случае, когда интенсивность высокая, то появляется дополнительная систематическая ошибка, которая может быть компенсирована калибровкой;
- ошибки, зависящие от времени выдержки при съемке изображения. При длинных выдержках изображение сдвигается к камере (расстояния сокращаются);
- ошибки, зависящие от внутренней температуры камеры, а также температуры окружающей среды.

Далее формализуется задача обработки данных дальномера PMD-камеры: Обозначим через D^i карту дальности для i -го изображения, а через D_p^i — измеренное расстояние для p -го пикселя матрицы на i -м изображении. Пусть $P(\dots)$ — оператор проекции изображения, функция от внутренних параметров f_x, f_y, c_x, c_y и k_c , которые были определены на первом этапе определения внутренних параметров:

$$P: R \times R^2 \rightarrow R^3, \quad (1)$$

тогда глобальные координаты точки X_p^i , соответствующей пикселю p на i -том изображении выражаются:

$$X_p^i = {}^W T_{TCP}^i \times {}^{TCP} T_C \times P(D_p^i - E_p^i, p), \quad (2)$$

где ${}^W T_{TCP}^i$ — матрица трансформации из TSP в мировые координаты, ${}^{TCP} T_C$ — матрица трансформации из координат камеры в TSP.

Выражение (2) описывает общую модель обработки данных дальномера.

Рассмотрим более подробно ошибку измерения дальности E_p^i . Положим, что эта ошибка зависит от трех факторов: ошибка, зависящая от расстояния до объекта; ошибка, зависящая от задержки распространения сигнала; и ошибка, зависящая от интенсивности. Таким образом, модель искажений будет выглядеть так:

$$E_p^i = D + P + I. \quad (3)$$

Так как в задаче автоматического извлечения объектов из контейнера измеряемые расстояния находятся в пределах двух метров, то можно проигнорировать периодичность ошибки, что позволяет использовать для моделирования полином третьей степени вместо синусоидальной функции:

$$D(D_p^i) = \sum_{k=0}^3 c_k [D_p^i]^k. \quad (4)$$

Ошибка задержки распространения сигнала зависит от относительного расположения пикселя в CMOS матрице, поэтому ее можно описать линейной функцией от координат пикселя в матрице:

$$P(r, c) = p_0 + p_1 r + p_2 c. \quad (5)$$

Предполагается, что ошибка задержки минимальна в одном углу изображения и максимальна в диагонально противоположенном углу.

Ошибка интенсивности. Объекты с низким коэффициентом отражения отображаются ближе на изображении к камере. Поэтому, зная значения интенсивности каждого пикселя (изображение интенсивности), можно описать ошибку полиномом второй степени:

$$I(I_p^i) = i_0 + i_1 [I_p^i] + i_2 [I_p^i]^2, \quad (6)$$

где I_p^i – значение интенсивности пикселя p на i -м изображении интенсивности.

Тогда, задав плоскость нормалью \bar{n}^i , зная положения камеры относительно этой плоскости, при данном расстоянии d^i и используя X_p^i из выражения (2), можно сказать, что выражение

$$(\bar{n}^i)^T X_p^i + d^i = 0 \quad (7)$$

является целевой функцией, которая равна нулю в случае, когда отсутствуют ошибки. Таким образом, задача обработки данных PMD-камеры заключается в поиске оптимальных параметров ($param$) предложенной модели E_p^i (3). Мы имеем задачу о наименьших квадратах вида:

$$param = \min_{param \in R^n} \sum_i \sum_p \left[(n^i)^T X_p^i + d^i \right]^2. \quad (8)$$

Задачи такого вида решаются с помощью соответствующих методов оптимизации.

В завершении второй главы предлагается метод реконструкции трехмерной сцены с использованием PMD-камеры. Разрабатываемый метод должен учитывать особенности PMD-технологии: низкое разрешение, малый угол обзора и позволять эффективно применять данную технологию в задаче автоматического извлечения объектов из контейнера.

Разработанный метод трехмерной реконструкции сцены позволяет компенсировать перечисленные недостатки за счет возможности реконструкции сцены по нескольким изображениям, что в свою очередь возможно благодаря такому преимуществу PMD-



Рисунок 1 – Схема реконструкции трехмерной сцены

камеры, как способность получения изображений в реальном времени.

В рамках разработки метода формулируется общая математическая постановка задачи реконструкции трехмерной сцены по данным с PMD сенсора.

Можно выделить следующие этапы реконструкции трехмерной сцены (рис.1):

1. Получение изображения объекта и соответствующей карты дальности. Данные о расстоянии трансформируются в трехмерные модели относительно системы координат камеры, то есть каждый пиксель с информацией о расстоянии трансформируется в точку в пространстве координат камеры, используя матрицу проекции.

2. Трансформация точек в глобальную систему координат. Каждому пикселю полученного изображения ставится в соответствие значение карты дальности, полученное с помощью PMD принципа. Карты дальности показывают расстояние до объекта относительно сенсора. Для перевода данных в глобальную систему координат необходимо выполнить следующие трансформации:

$$p_{world} = {}^{world}T_{TCP} {}^{TCP}T_{camera} p_{camera} \quad (9)$$

где ${}^{TCP}T_{camera}$ – трансформационная матрица из системы координат камеры в систему координат центра рабочего инструмента манипулятора. ${}^{world}T_{TCP}$ – трансформационная матрица из системы координат центра рабочего инструмента в глобальные координаты.

3. Расчет воксельной модели. На базе множества точек в мировой системе координат рассчитывается воксельная модель сцены.

4. Расчет полигональной модели. На базе трехмерной воксельной модели с помощью триангуляции Делоне вычисляется полигональная модель сцены.

5. Сглаживание полигональной модели с помощью оператора Лапласа.

В **третьей главе** разрабатываются: функциональная модель системы, алгоритм управления, алгоритм обработки информации, включающий в себя определение внутренних и внешних параметров камеры и обработку данных дальномеров камеры; алгоритм реконструкции трехмерной сцены по нескольким изображениям с PMD-камеры.

С точки зрения теории автоматического управления, предложенная система автоматического извлечения объектов из контейнера является управляемым комплексом, включающим в свой состав системы автоматического управления роботом, камерой, захватом. Проведенный системный анализ позволил выявить принципиальные элементы системы и структурные связи между переменными и элементами исследуемой системы. Таким образом, проблема автоматического извлечения объектов из контейнера является хорошо структурированной, предлагаемая функциональная модель системы показана на рис.2.

На рис. 2 зеленым цветом отмечены процессы, которые используют разработанные методы обработки информации. Проблема автоматического извлечения объектов из контейнера, помимо представленных методов включает в себя: задачу распознавания объектов (процесс анализа сцены), задачу расчета точек и стратегии захвата, а также задачи планирования траектории движения робота. Более того, для управления процессом решения поставленной задачи

также необходимо иметь интерфейсы взаимодействия с контроллерами камеры, робота и захвата.

Проблемы распознавания образов и планирования траектории движения робота – это отдельные, довольно широкие области исследований. В рамках диссертационной работы указанные проблемы не решаются, для анализа сцены используется иерархический итерационный метод распознавания объектов на основе анализа многомерных данных, а для планирования траектории использованы методы поиска траекторий, разработанные в институте управляющих вычислительных систем и робототехники технического университета Карлсруэ.

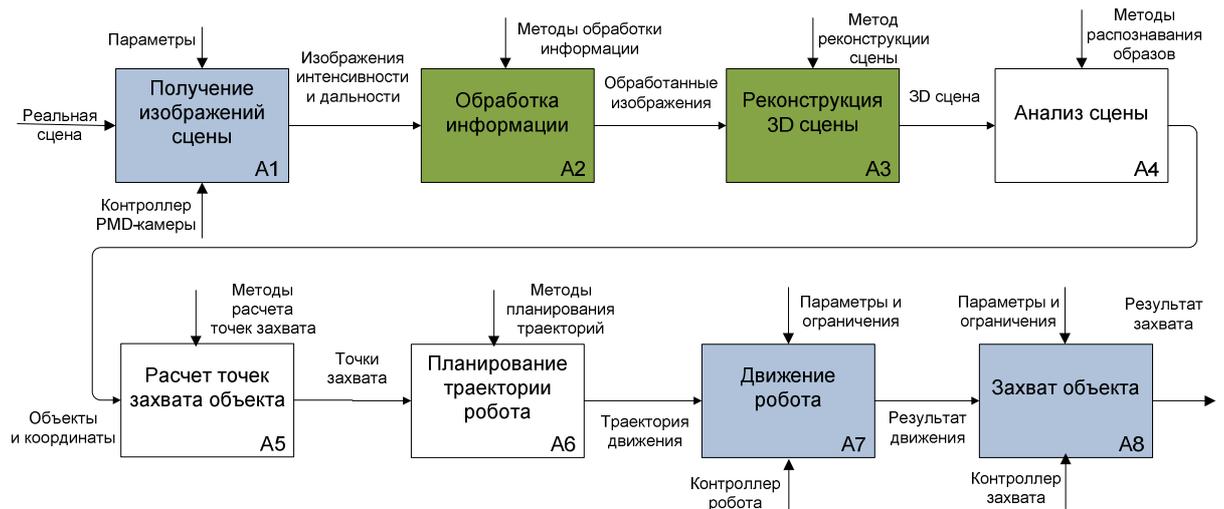


Рисунок 2 – Функциональная модель системы

Системный анализ задачи автоматического извлечения объектов из контейнера показал, что данная задача является детерминированной и хорошо структурированной. Исходя из этих соображений, при разработке алгоритма управления предложено использовать ситуационный подход. Разрабатываемый метод основан на обнаружении ситуаций из заранее определенного множества и принятия управленческих решений, ассоциированных с ситуациями. Для описания переходов ситуаций используются событийные модели различных видов, в частности, конечные автоматы. Конечные автоматы в настоящее время все шире применяются в различных областях программирования. Их основными достоинствами являются простота и наглядность. На рис. 3 показан конечный автомат, реализующий задачу управления системой автоматического извлечения объектов из контейнера.

Для реализации предложенных методов и алгоритмов было разработано программное обеспечение для системы автоматического извлечения объектов из контейнера с использованием PMD-технологии.

Программное обеспечение разрабатывалось на базе V-Model. На стадии анализа требований к системе использовались результаты системного анализа и был разработан сценарий работы. Модель системы и ее архитектура разрабатывалась с учетом требований гибкости и модульности, на стадии проектирования отдельных модулей системы были разработаны стандарты и протоколы обмена информацией, а также необходимые интерфейсы. Также разработано ПО

прошло необходимые стадии верификации, тестирование системы было проведено на базе разработанного экспериментального стенда, что позволило выявить некоторые ошибки и оптимизировать код.

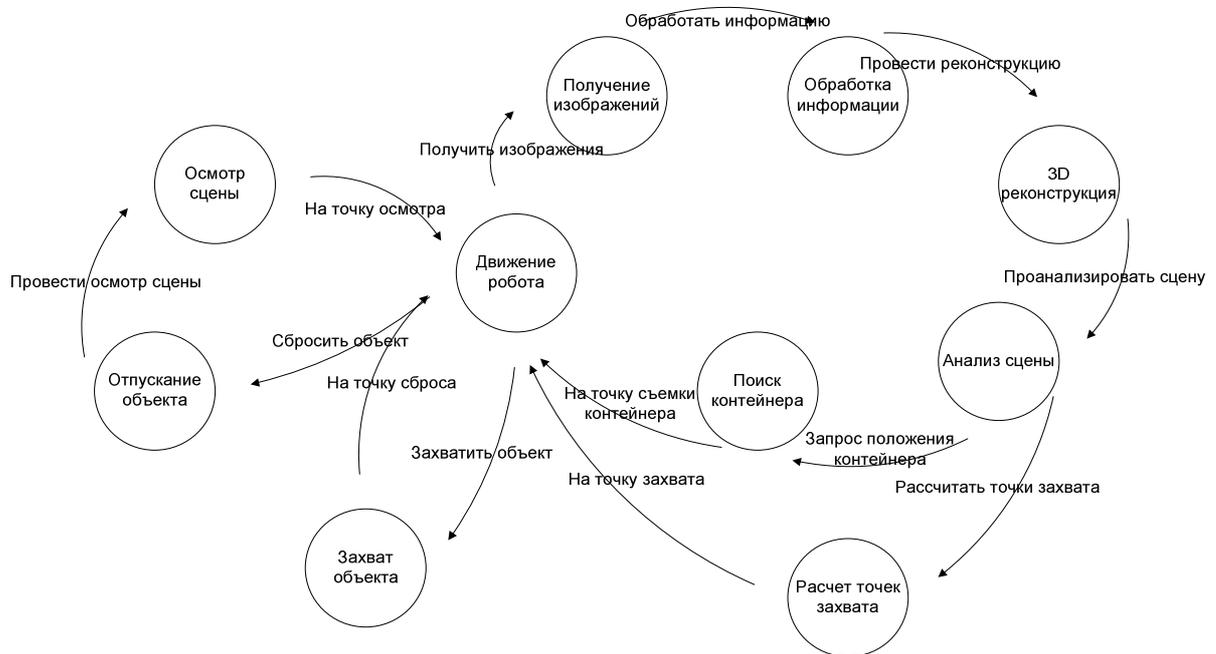


Рисунок 3 – Конечный автомат реализующий задачу управления системой

Система состоит из основного модуля, который обеспечивает управление сетевой коммуникацией, обрабатывает XML сообщения от модулей с учетом правил доступа к ресурсам, хранит настройки и т.д.; а также модулей (рис. 3):

- управления роботом: позволяет управлять роботами, используя разработанные интерфейсы и XIRP протокол;
- управления PMD-камерой: позволяет получать и сохранять данные от PMD камеры, осуществляет настройку параметров камеры;
- моделирования: делает реконструкцию сцены, строит воксельную и полигональную модели;
- обработки информации: позволяет автоматически определять параметры и обработку данных дальномера PMD-камеры;
- планирования траектории: вычисляет траекторию робота с учетом препятствий;
- захвата: планирует стратегию захвата объектов с учетом взаиморасположения объектов и управляет механическим захватом;
- расчета точек захвата: рассчитывает точки захвата для извлекаемого объекта.

Каждый модуль системы реализован как отдельный процесс, который имеет XML-интерфейс для внутренней коммуникации с другими модулями или с графическим интерфейсом. Также модуль может состоять из субмодулей, запускаемых в виде отдельных потоков. Тогда один из них является контрольным субмодулем, который организует работу других субмодулей и общается

с другими модулями системы (рис.3). Такая архитектура позволяет добиться гибкости, надежности и быстродействия.

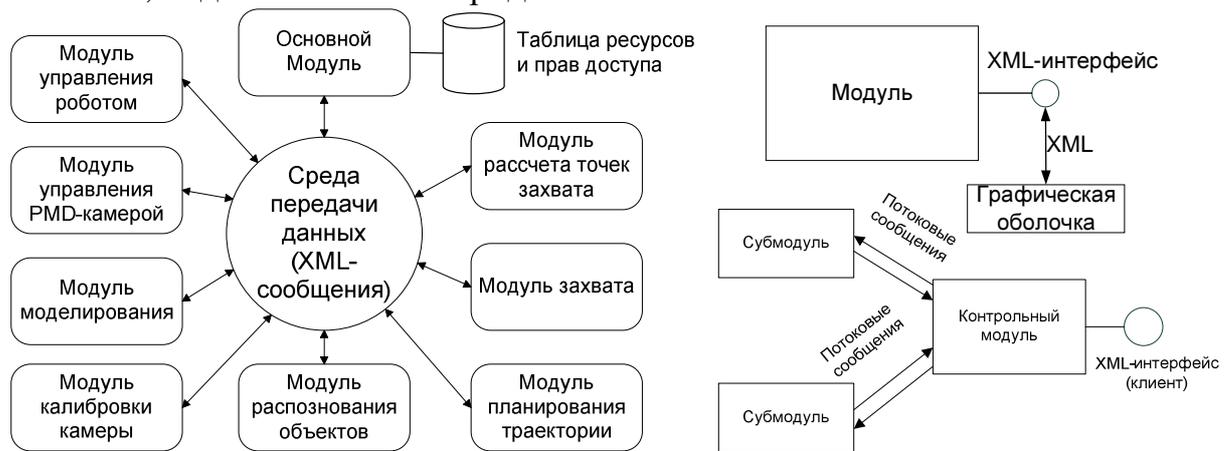


Рисунок 4 – Архитектура системы

Четвертая глава посвящена разработке экспериментального стенда и анализу эффективности разработанных методов и подхода к решению задачи автоматического извлечения объектов из контейнера с использованием РМД-технологии.

В качестве объектов для извлечения были выбраны полиэтиленовые трубы из ПВХ (ГОСТ 22689.2-89). Данные трубы обладают однотонной текстурой, что позволяет проверить эффективность разработанной системы на однотонных объектах, которые часто используются в промышленности. Так как сценарий демонстрации также входит сортировка объектов, то использовались два типа труб: прямые и изогнутые.

Робототехническая система была построена на базе промышленного робота Kuka «KR60HA». Данный манипулятор является роботом повышенной точности со средней грузоподъемностью и позволяет оперировать грузами до 60 кг. Серия «HA» (High Accuracy) отличается повышенной точностью.

В качестве рабочего инструмента для манипулятора был выбран двухпальцевый захват с электроприводом Schunk PG70. Для связи с управляющим компьютером используется интерфейс RS-232. Управление захватом обеспечивает модуль программного обеспечения «Gripper».

Система позволяет работать с двумя моделями РМД камер: ifm o3d100 (разрешение матрицы 64x50 пикселей) и ifm LynCube (разрешение матрицы 200 x 200 пикселей).

Рабочая сцена была создана в лабораторном помещении и занимает пространство размерами 6м x 7м x 5м (ширина x длина x высота). Помимо манипуляторов (Kuka KR60HA, Kuka KR16 и ReisRobotics RV-6L), их блоков управления и компьютеров, тестовый стенд оборудован рабочим столом, на котором размещается контейнер с неотсортированными объектами и контейнер для классификации объектов; также столом, на котором находятся контейнеры для отсортированных объектов. Для обеспечения безопасности была определена рабочая зона манипуляторов, а операторское место оборудовано кнопками экстренного выключения системы.

Построенная система позволила на практике проверить разработанные методы, модели и алгоритмы, провести эксперименты на реальных деталях, а также выявить и устранить недостатки проектирования ПО на начальных этапах.

Для анализа эффективности предложенных методов была проведена серия экспериментов, для решения задач предварительной обработки использовались различные статистические методы: проверка гипотез, оценивание параметров и числовых характеристик случайных величин и процессов, корреляционный и дисперсионный анализ.

При обработке числовых массивов результатов эксперимента, как случайных величин, применялись следующие выборочные оценки: математическое ожидание и дисперсия.

В таблице 1 показаны параметры РМД-камер, полученные на первом этапе предложенного метода обработки информации. Для определения параметров было получено 14 изображений шаблона с разных ракурсов.

Таблица 1. Результаты первого этапа калибровки

Камера \ Параметр	o3d100	LynCube
f_x/f_y	80,3/80,7	232,4/231,5
c_x/c_y	24,8/32,1	92,9/84,5
Смещение (X,Y,Z)	1,8 /120,6 /69,4	117,7 /32,5 /164,4
Поворот (R_x, R_y, R_z)	0,1/ 0,4 / 180,2	0,3/0,1 /179,8

Для качественной оценки разработанного метода обработки данных дальномер РМД-камеры было получено по 100 изображений белой калибровочной стены с обеих камер: o3d100 и LynCube. Для анализа зависимости погрешности РМД камер от диапазона измерения наблюдения проводились с 4-х разных расстояний: 497 мм, 956 мм, 1461 мм, 1942 мм – для LynCube; 485 мм, 938 мм, 1423 мм, 1902 мм – для o3d100. Незначительная разница в удалении камер не влияет на точность сравнения и обуславливается особенностями калибровочного стенда и разными размерами камер. В итоге было получено 1600 изображений, по 800 для каждой камеры. Половина изображений (по 50 штук для каждой камеры и каждого расстояния до стены) была выбрана случайным образом в качестве тренировочного набора, на базе которого проводилась обработка данных РМД-камеры. Вторая половина изображений использовалась для анализа эффективности. Погрешность дальномер определялась с помощью расчета математического ожидания для каждого пикселя и стандартным отклонением по всем пикселям. На рис. 4 показаны трехмерные графики дальностей, построенные с помощью программы gnuplot. Первый график построен по необработанным данным, на нем наблюдается значительное отклонение значений и резкий подъем (удаление от камеры) в одном из углов камеры. Вторым график построен по обработанным данным, на нем поверхность не имеет значительных пиков и отклонение по каждому пикселю значительно уменьшено. Таблица 2 позволяет сравнить точность дальномер камеры o3d100 до обработки и после нее. Среднее отклонение на данном диапазоне расстояний до калибровки

составило 15,5, а после 6,6 мм.

Как показано в таблице 3, разработанный метод обработки данных PMD-камеры LynCube позволяет получить значительное снижение погрешности измерений дальномера. Среднее отклонение камеры до калибровки составляло около 82,36 мм, а максимальное 173,49 мм. После калибровки среднее отклонение стало 11,34 мм, максимальное – 18,77 мм.

Таблица 2. Точность камеры o3d100.

Расстояние (мм)	До калибровки		После калибровки	
	среднее	отклонение	среднее	отклонение
485	494,9	12,0	486,2	6,1
938	943,8	8,5	940,2	4,6
1423	1436,2	14,4	1425,8	7,6
1902	1910,9	26,9	1904,4	8,1

Таблица 3. Точность камеры LynCube.

Расстояние (мм)	До калибровки		После калибровки	
	Среднее	отклонение	среднее	отклонение
497	546,4	38,8	497,1	7,4
956	1028,4	24,5	958,5	4,6
1461	1568,5	92,5	1466,7	14,5
1942	2036,9	173,4	1955,8	18,7

Эффективность метода реконструкции сцены можно проанализировать с помощью количественного показателя – времени реконструкции. Так как разработанный метод реконструкции трехмерной сцены по данным с PMD-камеры априори имеет меньшее число необходимых действий, в отличие, например, от стереокамер, то в сравнение с последними он неизбежно выигрывает. Время реконструкции напрямую зависит от конфигурации системы и вычислительной мощности процессора или графической карты. Качество реконструкции сцены позволило модулю распознавания объектов проводить анализ сцены с точностью, необходимой для решения задачи извлечения объектов из контейнера.

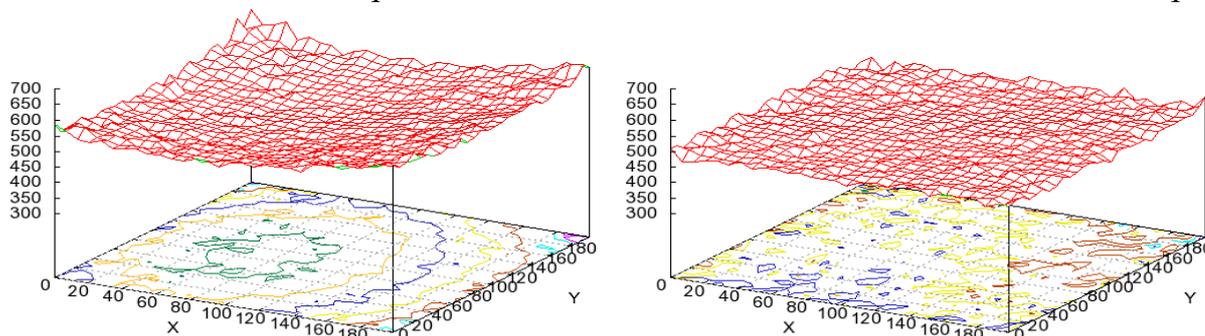


Рисунок 5 – Необработанные (слева) и обработанные (справа) данные о расстоянии

Эффективность подхода проверялась испытаниями, в которых система должна была разобрать контейнер с объектами согласно сценарию. В случае разбора всех объектов, система останавливалась, контейнер снова загружался объектами в случайном порядке и процесс возобновлялся. Серии испытаний

показали высокую надежность системы, в подавляющем большинстве случаев контейнер разбирался полностью.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В рамках диссертационной работы разработаны методы обработки информации и решена задача управления в системе автоматического извлечения объектов из контейнера с использованием PMD-технологии.

1. Проведен системный анализ проблемы автоматического извлечения объектов из контейнера, в рамках которого рассмотрены существующие подходы, их достоинства и недостатки, проведена классификация систем по типу сенсорной технологии, что позволило оценить целесообразность и эффективность использования PMD-технологии в поставленной задаче;

2. Разработан метод обработки информации, состоящий из метода определения внутренних и внешних параметров PMD-камеры и метода обработки данных ее дальномера. В методе определения параметров предложено использовать предварительно масштабирование на основе метода билинейной интерполяции, что позволило компенсировать низкое разрешение PMD-камеры, также реализовано определение ориентации шаблона, что позволяет автоматизировать процесс определения параметров. В методе обработки данных дальномера PMD-камеры предложена оригинальная модель ошибок, основанная на анализе физических принципов PMD-технологии, что позволило значительно снизить погрешность измерений.

3. Разработан метод трехмерной реконструкции сцены на основе данных с PMD-камеры, который, в отличие от известных, позволяет осуществлять трехмерную реконструкцию по нескольким изображениям, что позволяет компенсировать малый угол обзора и низкое разрешение PMD-камеры и получать более точную реконструкцию сцены.

4. Предложена функциональная модель и алгоритм управления, которые основаны на разработанном подходе к решению задачи автоматического извлечения объектов из контейнера с использованием PMD-камеры. Разработано алгоритмическое обеспечение, реализующее предложенные методы и программное обеспечение, основанное на V-модели разработки информационных систем, что позволило определить единую процедуру разработки ПО, аппаратного обеспечения и человеко-машинных интерфейсов.

5. Создан экспериментальный стенд для решения задачи автоматического извлечения объектов из контейнера и проведен анализ эффективности предложенных методов и подхода в целом. Показано что: разработанный метод обработки информации позволяет увеличить точность получаемых от PMD-камеры данных на 50-60 % в случае камеры o3d100 и на 55-65% в случае с камерой LynCube, а относительная погрешность измерения дальности снижена до 1,26% и 1,49% соответственно; разработанный метод трехмерной реконструкции позволяет эффективно использовать PMD-технологии в поставленной задаче.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Программное обеспечение для решения задачи извлечения деталей из контейнера с использованием технологии PMD / Н. Юсупова, Х. Вёрн, И. Мамаев // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. Серия "Управление, вычислительная техника и информатика". 2010. Т. 14, № 1 (36). С. 148–153.

В других изданиях

2. Поиск пути многозвенного манипулятора в сложном трехмерном пространстве с использованием параллельных вычислений / Н. Юсупова, Г. Шахмамеева, А. Камильянов, И. Мамаев // Матер. 8-й межд. науч. конф. CSIT'2006. Карлсруэ, Германия, 2006. Т. 2. С. 1–5. (Статья на англ. яз.).

3. Проблемы поиска траекторий многозвенных манипуляторов в сложном трехмерном пространстве / И.Р. Мамаев, А.Р. Камильянов // Информатика, управление и компьютерные науки : сб. ст. 1-й рег. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых учёных. Уфа: УГАТУ, 2006. Т. 2. С. 87–93.

4. Алгоритмы поиска оптимальных траекторий робота / И. Мамаев, М. Венц, Х. Вёрн, Н. Юсупова // Матер. 9-й межд. науч. конф. CSIT'2007. Красноуфольск, Россия, 2007. Т. 1. С. 28–33. (Статья на англ. яз.).

5. Об одном подходе к моделированию управления движением манипулятора / И. Р. Мамаев // Сб. ст. 2-й рег. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых учёных. Уфа : УГАТУ, 2007. Т. 1. С. 101–107.

6. Система реального времени для решения задачи автоматического извлечения деталей из контейнера при использовании преимуществ PMD технологии / И. Р. Мамаев, К. В. Сафронов, И. М. Чушенков, Х. Вёрн // Матер. 10-й межд. науч. конф. CSIT'2008. Анталия, Турция, 2008. Т. 1. С. 21–26 (Статья на англ. яз.).

7. PMD технология: Особенности калибровки PMD камеры / И. Р. Мамаев, К. В. Сафронов, Х. Вёрн // Информатика, управление и компьютерные науки: сб. ст. 3-й рег. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых учёных. Уфа: УГАТУ, 2008. С. 154–160.

8. 3D- реконструкция сцены в промышленных задачах с помощью новой трехмерной камеры / Х. Верн, Ю. Граф, К. Сафронов, И. Мамаев // Измерительная техника: науч.-техн. журнал. Гейдельберг : Вихманн Ферлаг, 2009. С. 200–206. (Статья на нем. яз.).

9. Свид. об офиц. рег. программы для ЭВМ № 2010615109. Система автоматического извлечения объектов из контейнера / И. Р. Мамаев. Роспатент, 2010.

МАМАЕВ Ильшат Ринатович

УПРАВЛЕНИЕ
И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ
ОБЪЕКТОВ ИЗ КОНТЕЙНЕРА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РМД-ТЕХНОЛОГИИ

Специальность 05.13.01
Системный анализ, управление и обработка
информации (в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 15.11.2010. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр. – отт. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 447.
ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный
технический университет
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12