

1564261

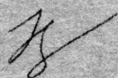
Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана

На правах рукописи

Копылов Юрий Викторович

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ
ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ РОБОТОМ

05.02.05 – Роботы, манипуляторы и робототехнические
системы



Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1999

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом
Университете имени Н. Э. Баумана

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Михайлов Б. Б.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Клевалин В. А.
кандидат технических наук, доцент
Панков В. А.

Ведущая организация: ЦНИИ робототехники и техниче-
ской кибернетики (ЦНИИ РТК),
г. Санкт-Петербург

"18" сентября 1999г. на заседании

Автоматические приводы и сис-
темы Московского Государственного Технического Уни-

верситета, дом 5.

заверенные гербовой печатью,

находящаяся в библиотеке МГТУ им.

сентября 1999г.

Совета

Максимов А. И.

и 1.0 в.л. Тир. 100 экз.

Типография МГТУ

1564261

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1564261

Копылов Ю. В. Алгоритмический

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

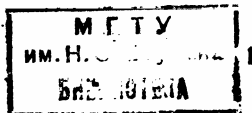
Актуальность темы. Робототехника является одним из наиболее приоритетных направлений развития народного хозяйства. С каждым годом все более расширяется применение робототехнических систем. С их помощью осваиваются технологические процессы, освобождающие людей от многих видов утомительного, однообразного, тяжелого труда, а также работы во вредных для здоровья человека условиях. Гамма промышленных и специальных роботов очень велика: от дистанционно управляемых манипуляторов, до адаптивных робототехнических комплексов (РТК), которые не требуют присутствия человека-оператора во время своей работы.

Адаптивные роботы относятся к наиболее сложному классу систем. Одним из основных элементов адаптивного робота является система очувствления. Ее задача состоит в сборе информации об изменениях внешней среды и оценке состояния компонент устройства управления и манипулятора. В состав информационных систем адаптивных роботов входят силомоментные, тактильные, локационные системы очувствления, а также системы технического зрения (СТЗ). Среди перечисленных выше систем, СТЗ обладает наибольшей информативной емкостью: от 80 до 90% информации о свойствах объекта манипулирования и параметрах внешней среды, робот получает с помощью технического зрения.

1564261
Одной из актуальных задач в робототехнике является обнаружение подвижных объектов. СТЗ для обнаружения подвижных объектов используются в самых разных областях: при работе с деталями на конвейере, для контроля трафика на железных дорогах и шоссе, в охранных системах и т. п. Наиболее сложными являются системы, способные работать в условиях недетерминированной внешней среды, с реальными объектами сложной формы. К сожалению, в настоящее время разработки подобных систем сдерживаются отсутствием алгоритмов адаптации системы к изменяющимся внешним условиям. Поэтому разработка СТЗ для обнаружения подвижных объектов в условиях сложного фона является одной из актуальных задач на текущем этапе развития робототехники.

В диссертации рассмотрены вопросы, связанные с разработкой алгоритмического и программного обеспечения адаптивной СТЗ для ведения наблюдения за подвижными объектами в экстремальных условиях. Главным достоинством такой системы является ее полная автономность. Система не требует присутствия человека-оператора во время своей работы, что позволяет оградить последнего от нежелательных воздействий со стороны внешней среды.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка принципов адаптации СТЗ к изменяющимся внешним условиям, а также алгоритмического и программного обеспечения адаптивной СТЗ для обнаружения подвижных объектов на сложном фоне.



В соответствии с этим в работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка метода автоматической настройки СТЗ по яркости.
2. Разработка процедуры адаптивной фильтрации на этапе предварительной обработки изображений.
3. Разработка принципов обнаружения и вычисления характеристик подвижных объектов на сложном фоне.
4. Организация процесса совместного функционирования разработанных алгоритмов в составе СТЗ, моделирование работы системы.
5. Проведение экспериментальных исследований разработанного алгоритмического и программного обеспечения СТЗ в лабораторных условиях и на реальных рабочих сценах.

Методы исследования. Поставленные задачи решаются с помощью аппарата математической статистики, теории нечетких множеств, теории оптимального управления, а также теории массового обслуживания. В ходе работы использовались процедуры настройки СТЗ по яркости, фильтрации, бинаризации и сегментации изображений, а также методы идентификации динамических объектов и вычисления их характеристик.

Исследование работоспособности разработанных алгоритмов проводилось как методом моделирования, так и путем испытаний СТЗ в лабораторных условиях и на реальных рабочих сценах.

Научная новизна работы

Разработаны принципы адаптации СТЗ к изменяющимся внешним условиям, позволяющие системе подстраиваться под изменения освещенности и помеховой обстановки непосредственно в процессе работы, и предложены алгоритмы, их реализующие. Разработана методика оценки качества процедур обработки изображений исходя из условий работы СТЗ. В результате использования указанных алгоритмов и методики упрощается выделение малоконтрастных объектов из фона и снижается вероятность ложных срабатываний системы. Предложен алгоритм, позволяющий обнаруживать подвижные объекты в условиях сложного фона на основе анализа их движения, повышающий вероятность обнаружения объектов в недетерминированных условиях. Разработана математическая модель параллельного функционирования этапов обработки изображений в СТЗ, обеспечивающая повышение точности вычисления траектории объектов за счет увеличения частоты поступления изображений в систему.

Практическая ценность и внедрение. Практическая ценность результатов, полученных в диссертационной работе, заключается в создании эффективных алгоритмов обработки изображений в условиях недетерминированной внешней среды и программного обеспечения, реализующего эти алгоритмы. Разработанный комплекс алгоритмического и программного обеспечения может быть использован в реальных робототехнических системах и комплексах для обнаружения подвижных объектов.

Проведенные исследования являются частью фундаментальных исследований в области обработки изображений, которые проводились в МГТУ им. Н. Э. Баумана в течение последних лет. Они выполнялись в рамках государственных тем НИЧ 1-33/97 "Разработка информационного обеспечения интеллектуальных робототехнических систем" (1997г.), НИЧ 1-33/98 "Разработка информационного обеспечения интеллектуальных робототехнических систем с распределенной структурой для выполнения сложных операций в экстремальных условиях" (1998г.).

Основные научные и практические результаты диссертации внедрены в НПФ "Сигма-ИС" при проектировании системы охранно-пожарной сигнализации по Госконтракту № 409 от 15.08.1998 г. Созданный программный пакет используется в Научно-Учебном центре "Робототехника" МГТУ им. Н. Э. Баумана при выполнении научно-исследовательских работ и в учебном процессе.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и были обсуждены на: 7-й научно-технической конференции "Экстремальная робототехника" (г. Санкт-Петербург, Россия, 1996г.); 14-й Российской научно-технической конференции "Неразрушающий контроль и диагностика" (г. Москва, Россия, 1996г.); конференции-школе "Технические средства изучения и освоения океанов и морей" (г. Москва, Россия, 1996г.); 8-й научно-технической конференции "Экстремальная робототехника" (г. Санкт-Петербург, Россия, 1997г.); научном семинаре кафедры прикладной механики МГУ в 1998г.; 10-й научно-технической конференции "Экстремальная робототехника" (г. Санкт-Петербург, Россия, 1999г.); на научных семинарах Научно-Учебного центра "Робототехника" МГТУ им. Н. Э. Баумана в 1996 - 1999г.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы нашли отражение в 8 научных трудах, среди которых 6 статей и 2 отчета по НИР.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем работы составляет 212 печатных страниц, включая рисунки, список литературы и приложения. Библиография содержит 102 наименования, из них 22 иностранных источника.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определено место СТЗ в системах очувствления роботов, определена область исследования, описана структура работы.

В первой главе проведена постановка задачи разработки адаптивной СТЗ для обнаружения подвижных объектов на сложном фоне, определено основное назначение СТЗ рассматриваемого типа, как системы обнаружения объекта наблюдения на местности, определения траектории его движения и дальнейшего слежения за его перемещением.

В главе проведен обзор литературы: рассмотрены существующие на сегодняшний день разработки по созданию СТЗ, связанные с наблюдением за движущимися объектами; проведен анализ используемых в них математических методов решения задач по обнаружению объекта наблюдения, вычислению траектории его движения и координат в заданный момент времени. Проведенный анализ показал, что большинство этих подходов не могут использоваться в условиях сложного фона, а остальные базируются на информации о типе объекта, его векторе скорости и т. п., или требуют слишком длительного времени работы. Таким образом, автор пришел к выводу, что рассмотренные методы не позволяют решить поставленную задачу. Для решения этой задачи необходимо разработать адаптивную СТЗ, подстраивающуюся под изменяющиеся внешние условия в процессе работы, что дает ей возможность работать в условиях недетерминированной внешней среды.

Далее в главе проведен структурный анализ процесса обработки информации в СТЗ и анализ его характеристик. В ходе этого анализа рассмотрена традиционная структура процесса обработки изображений в СТЗ, и проведено разделение этого процесса на составляющие этапы: этап настройки, целью которого является адаптация СТЗ к изменению освещенности сцены в процессе работы; этап предварительной обработки, целью которого является удаление помех, присутствующих на изображении; этап обнаружения объектов и вычисления их характеристик. На основе проведенного анализа в диссертации определен круг задач, связанных с проблемой разработки адаптивной СТЗ для обнаружения подвижных объектов.

Во второй главе разрабатывается математическая модель адаптивной СТЗ для обнаружения подвижных объектов, а также математические модели этапов процесса обработки информации в СТЗ, перечисленных в главе 1.

Формализация процесса функционирования СТЗ с целью его дальнейшего исследования проведена автором в терминах теории массового обслуживания. В диссертации предложена модель СТЗ в виде трехфазной системы массового обслуживания (СМО), в которой функция генератора заявок соответствует функции дискретизации входной информации в СТЗ (рис. 1). Каждая заявка на обслуживание $z_i = z_i(t_i^{\text{вх}}, t_i^{\text{вых}}, \omega_i, I_i^{\text{ф}}, I_i^{\text{об}})$ представляет собой одно изображение и характеризуется рядом параметров:

$t_i^{\text{вх}}$ – момент поступления заявки в систему;

$t_i^{\text{вых}}$ – момент завершения процесса обслуживания заявки в системе (параметр, который фиксируется в момент выхода заявки из системы);

ω_i – обобщенная характеристика яркости и контрастности изображения;

$I_i^{\text{ф}}$ – информация о фоновой среде, в которой находится объект наблюдения;

$I_i^{\text{об}}$ – информация об объекте наблюдения.

цирующие настройку частоты поступления заявок в систему в момент запуска ($\bar{u}_{n1}(t)$); команды, инициирующие настройку системы на заданную задачу перед ее запуском ($\bar{u}_{n2}(t)$, $\bar{u}_{n3}(t)$); команды включения и прерывания работы фаз системы в соответствии с заданными приоритетами ($\bar{u}_j(t)$).

В основе процесса настройки СТЗ по яркости лежит принцип работы автоматического регулятора, обеспечивающего минимизацию отклонения числовых характеристик гистограммы поступившего изображения от оптимума. Если это отклонение выше допустимого, изменяются значения специальных регистров платы видеоввода, управляющих яркостью и контрастностью вводимого изображения.

В качестве основных характеристик гистограммы рассматриваются два параметра: λ_{11} – средняя величина интенсивности пикселей (соответствует общей яркости изображения) и λ_{12} – средняя величина абсолютного отклонения от центра гистограммы (мера контрастности изображения).

Процесс регулировки яркости и контрастности изображения осуществляется посредством использования в системе платы видеоввода, обладающей возможностью регулировки яркости вводимого изображения посредством двух программно доступных регистров: регистра LEVEL, регулирующего уровень вводимого видеосигнала и влияющего на изменение параметра λ_{11} , и регистра GAIN, отвечающего за размах видеосигнала и влияющего на изменение параметра λ_{12} .

Настройка параметров λ_{11} и λ_{12} (яркость и контрастность изображения) осуществляется на базе критерия качества F_{11} :

$$F_{11} = \sum_{i=1}^2 M[|\lambda_{1i}^0 - \lambda_{1i}|] \rightarrow \min \quad (1)$$

путем изменения регистров LEVEL и GAIN платы видеоввода в соответствии с заранее заданными оптимальными значениями λ_{11}^0 и λ_{12}^0 (выбор этих оптимальных значений проведен в 3-й главе диссертации).

Минимизацию затрат по времени на проведение настройки яркости определяет выбор и разработка алгоритма и его программного обеспечения, реализующих описанную процедуру с наименьшими затратами по времени:

$$F_{21} = M[\tau_*] \rightarrow \min, \quad (2)$$

где τ_* – продолжительность настройки яркости изображения.

Целью второго этапа обработки изображений в СТЗ является удаление помех, присутствующих на изображении. Статическая составляющая изображения удаляется при формировании межкадровой разности. В результате получается изображение, представляющее собой набор пятен – следов движения объектов наблюдения и пятен – следов движения посторонних пред-

метов (помех). Для удаления этих помех в диссертации разработан алгоритм адаптивной фильтрации, который в процессе работы СТЗ на базе оценки каждого изображения выбирает для него наиболее эффективный фильтр из некоторого набора.

Для описания изображений был выбран аппарат теории нечетких множеств, позволяющий на доступном оператору языке охарактеризовать и классифицировать пятна, присутствующие на изображении. Каждое пятно описывается лингвистической переменной, задаваемой тройкой <"площадь пятна", T , $[1; S_{\max}]$ >, где:

- "площадь пятна" – название лингвистической переменной;
- $T = \{\text{"большое"}, \text{"среднее"}, \text{"мелкое"}, \text{"очень мелкое"}\}$ – термножество лингвистической переменной "площадь пятна";
- $[1; S_{\max}]$ – базовое множество значений переменной, $S_{\max}$ – максимально возможная площадь пятен.

Количество термов в термноестве T в общем случае может быть любым, однако для большинства задач 4-х градаций площадей пятен оказывается достаточно. Каждое изображение характеризуется посредством набора характеристик $\bar{\lambda}_2 = \{\lambda_{21}, \lambda_{22}, \lambda_{23}, \lambda_{24}\}$, где каждое λ_{2i} является количеством пятен, входящих в состав группы "больших", "средних", "мелких", "очень мелких" пятен соответственно, из присутствующих на изображении. Для оценки качества изображения уместно ввести такие лингвистические понятия, как "мало", "среднее количество", "много" и т. д. пятен, входящих в состав каждой группы, т.е. ввести оценку качества изображения в виде:

$$F_{12}(\bar{\lambda}_2) = \{F_{12}(\lambda_{21}), F_{12}(\lambda_{22}), F_{12}(\lambda_{23}), F_{12}(\lambda_{24})\},$$

где каждое из $F_{12}(\lambda_{2i})$ – одно из трех значений лингвистической переменной β : $\langle \beta, T(\beta), U_\beta \rangle$, где $T(\beta) = \{\text{"мало"}, \text{"среднее количество"}, \text{"много"}\}$.

Целью алгоритма предобработки изображений является сведение оценки F_{12} к некоторому оптимальному значению $F_{12}^0(\bar{\lambda}_2)$:

$$F_{12}(\bar{\lambda}_2) \rightarrow F_{12}^0(\bar{\lambda}_2). \quad (3)$$

Оптимальное значение F_{12} задается в виде фиксированного набора лингвистических оценок $F_{12}^0(\bar{\lambda}_2) = \{F_{12}^0(\lambda_{2i})\}$ для каждого конкретного изображения на основе его анализа в процессе предобработки, исходя из априорных знаний об объекте, позволяющих предположить, к какой из групп пятен принадлежит искомый объект.

Набор процедур, используемых в алгоритме адаптивной фильтрации, формируется на этапе настройки на базе лингвистического критерия K , задаваемого лингвистической переменной $\langle K, T(K), [0; 100] \rangle$, где $T(K) = \{\text{"плохой"}, \text{"средний"}, \text{"хороший"}\}$, $[0; 100]$ – числовая область определения

K , задающая процент помех, уничтоженных данным фильтром в рассматриваемой группе пятен. По разработанной в диссертации методике проводится оценка качества работы процедур фильтрации, находящихся в библиотеке стандартных процедур разрабатываемой СТЗ, в результате чего формируется множество наиболее эффективных фильтров P_2 . Алгоритмы формирования множества P_2 приведены в 3-й главе диссертации.

Временные затраты на этапе предобработки включают в себя затраты времени $\tau_{ок}$ на обслуживание заявок на этапе предобработки с учетом их возможных задержек в очереди на обслуживание $\tau_{ож}$:

$$F_{22} = M[\tau_{ок}] + M[\tau_{ож}]. \quad (4)$$

Основной задачей 3-го этапа обработки изображений в СТЗ является обнаружение подвижных объектов и вычисление их характеристик $\bar{\lambda}_3 = \{X, Y, V_x, V_y\}$, где X, Y – текущие координаты, V_x, V_y – проекции вектора скорости объекта на координатные оси. В качестве критерия точности работы данного этапа выбрана минимальная дисперсия при определении характеристик объекта $\bar{\lambda}_3$:

$$F_{13} = F_{13}(D[X], D[Y], D[V_x], D[V_y]) \rightarrow \min. \quad (5)$$

В связи с этим в работе был использован фильтр Калмана, обеспечивающий минимально возможную среднеквадратическую ошибку при вычислении характеристик объектов, т.е. удовлетворяющий условию (5).

Модель движения объекта была описана при помощи следующей системы уравнений:

$$X(i+1) = \Phi(i)X(i) + \Gamma(i)\xi(i) \quad (6)$$

$$Z(i) = H(i)X(i) + \eta(i) \quad (7)$$

Объект считается жестким, движущимся с постоянным вектором скорости. Его возможность к маневрированию отражена с помощью наличия шума $\xi(i)$. При этом:

$$E[\xi(i)] = 0, \quad E[\xi(i), \xi^T(k)] = Q(i)\delta_{ik}, \quad E[\eta(i)] = 0, \quad E[\eta(i), \eta^T(k)] = R(i)\delta_{ik}.$$

Предполагается, что $E[\xi(i), \eta^T(k)] = 0$ и что система, описываемая уравнениями (6) и (7), полностью управляема и полностью наблюдаема. Ниже приведен вид всех матриц и вектора измерений:

$$\Phi(i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \Gamma(i) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad H(i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad Z(i) = [\tilde{X}(i), \tilde{Y}(i)]^T.$$

Элементы матрицы $Q(i)$ задаются оператором на этапе настройки системы исходя из априорной информации об объекте наблюдения, элементы матрицы $R(i)$ были рассчитаны в процессе разработки СТЗ.

Временные затраты на этапе обнаружения объектов и вычисления их характеристик включают в себя затраты времени $\tau_{обс}$ на обслуживание заявок на этапе обнаружения объектов и вычисления их характеристик с учетом их возможных задержек в очереди на обслуживание $\tau_{ож}$:

$$F_{23} = M[\tau_{ож}] + M[\tau_{ож}]. \quad (8)$$

Разработанные математические модели этапов обработки изображений в СТЗ позволили разработать алгоритмы, реализующие эти этапы.

Третья глава диссертации посвящена разработке алгоритмического и программного обеспечения СТЗ для обнаружения подвижных объектов.

В соответствии с разработанной в главе 2 математической моделью, при разработке алгоритма автоматической настройки СТЗ по яркости для вычисления параметров гистограммы распределения яркости поступившего изображения были использованы следующие формулы:

$$\lambda_{11} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{I_{\max}} n_i i, \quad \lambda_{12} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{I_{\max}} n_i |\lambda_{11} - i|, \quad (9)$$

где $I_{\max}$ – максимально возможное значение интенсивности пикселей на изображении, n_i – количество пикселей с интенсивностью i , n – общее количество пикселей на изображении.

Характеристиками идеального изображения является средняя яркость, т.е. отсутствие засветки или затемнения изображения и максимальная контрастность, чтобы легче было выделить объект из фона, что соответствует равномерному распределению. Исходя из этого, были получены следующие оптимальные значения параметров гистограммы:

$$\lambda_{11}^0 = \frac{I_{\max}}{2}, \quad \lambda_{12}^0 = \frac{1}{I_{\max} + 1} \cdot \sum_{i=0}^{I_{\max}} \left| \frac{I_{\max}}{2} - i \right|.$$

Для определения влияния значений регистров платы видеоввода LEVEL и GAIN на величину параметров гистограммы вводимого изображения был проведен ряд экспериментов на различных рабочих сценах при различной погоде, освещении и времени суток. В ходе этих экспериментов в диссертации были получены формулы для расчета новых значений регистров платы, исходя из величин параметров гистограммы текущего изображения:

$$\Delta \text{LEVEL} = k_1 (\lambda_{11}^0 - \lambda_{11}^* - \Delta \text{GAIN} / k_{12}), \quad (10)$$

$$\Delta \text{GAIN} = k_2 (\lambda_{12}^0 - \lambda_{12}^*), \quad (11)$$

где ΔLEVEL и ΔGAIN – величины, на которые необходимо изменить значения соответствующих регистров, k_1, k_2, k_{12} – коэффициенты пересчета.

Полученные формулы являются универсальными для большинства плат видеоввода, однако используемые в них коэффициенты пересчета зависят от конкретной платы. В диссертации приведена методика выбора этих коэффициентов с учетом используемого оборудования.

В диссертации приведены блок-схема и подробное описание разработанного алгоритма автоматической настройки СТЗ по яркости. Разработанный алгоритм, благодаря использованию полученных формул и коэффициентов пересчета, позволяет подстраивать СТЗ в процессе работы за минимальное количество шагов – не более 2-х, обеспечивая минимизацию отклонения параметров гистограммы $\lambda_{11}, \lambda_{12}$ от заданных оптимальных значений.

В соответствии с разработанной в главе 2 математической моделью процесса предварительной обработки изображений в диссертации разработана структура алгоритмического и информационного обеспечения этого процесса. Эта структура отражает 3 этапа функционирования СТЗ.

На первом этапе – этапе обучения – формируется база данных (БД) результатов фильтрации для всех процедур, находящихся в библиотеке системы. Данная БД формируется исходя из условий решаемой задачи на основе тестовых изображений с типовыми ландшафтами или сценами, которые предоставляются оператором. Следует отметить, что в общем случае таких баз может быть несколько, например, БД для работы системы в зимнее время и БД для работы в летнее время.

На втором этапе – этапе настройки – на основе заданной БД формируется множество P_2 фильтров, наиболее эффективных в заданных условиях работы. Процедура формирования множества P_2 реализует отбор фильтров из библиотеки стандартных процедур фильтрации на базе лингвистического критерия K , определенного во 2-й главе диссертации. В состав этого множества входит 6 фильтрующих процедур (ФП):

$P_2 = \{ \text{"сильная ФП для средних пятен"}, \text{"слабая ФП для средних пятен"}, \text{"сильная ФП для мелких пятен"}, \text{"слабая ФП для мелких пятен"}, \text{"сильная ФП для очень мелких пятен"}, \text{"слабая ФП для очень мелких пятен"} \}$,

при этом, в качестве "сильных" ФП выбираются фильтры, "хорошие" по критерию K , а в качестве "слабых" ФП – фильтры "средние" по критерию K .

На третьем, рабочем этапе, для обработки поступающих в систему изображений используется адаптивный фильтр, который анализирует поступившее изображение, формирует для него оптимальную оценку $F_{12}^0(\bar{\lambda}_2)$, и обеспечивает фильтрацию поступившего изображения при помощи процедур из множества P_2 до тех пор, пока не будет достигнута оценка $F_{12}^0(\bar{\lambda}_2)$. Этот процесс является итерационным, причем на каждом шаге на основе сравнения текущей оценки F_{12} с оптимумом выбирается очередная группа пятен,

подлежащая фильтрации. При этом "сильные" ФП используются если пятен в фильтруемой группе "много", а "слабые" – если пятен "среднее количество".

При разработке алгоритма обнаружения подвижных объектов и вычисления их характеристик учитывалась специфика работы СТЗ с малоконтрастными объектами на сложном фоне. При этом возможно возникновение следующих проблем. Во-первых, в процессе предобработки объект наблюдения может распадаться на несколько пятен. Количество, форма и расположение этих пятен может изменяться от шага к шагу, что затрудняет слежение за объектом. Устранение этого эффекта происходит при помощи процедуры расширения изображения, с последующей кластеризацией пятен.

Во-вторых, поскольку на этапе предобработки полностью удалить помехи невозможно, на изображении могут присутствовать ложные объекты. В разработанном алгоритме они отсеиваются на основе анализа характера их движения: поскольку объект наблюдения обладает некоторой массой, а, следовательно, и определенной инерционностью, он не может, в отличие от помехи, резко остановиться или изменить направление своего движения.

В-третьих, в процессе слежения за объектом возможно возникновение таких ситуаций, когда объект пропадает за препятствиями или перекрывается другим подвижным объектом или помехой. В этом случае объект становится не виден, что может привести к сбою в работе системы. Чтобы этого не происходило, в алгоритме есть возможность прогнозирования траектории движения объекта в случае его внезапной потери. Если через 1-2 шага объект вновь появляется в поле зрения телекамеры, слежение за ним возобновляется. В противном случае считается, что объект остановился или потерян.

Для отработки процесса функционирования разработанной СТЗ проводилось моделирование ее работы на ПЭВМ с процессором Intel Pentium с тактовой частотой 100 МГц под управлением операционной системы MS Windows 95 OSR/2. В качестве рабочей сцены СТЗ был выбран участок проезжей части, съемки на котором проводились в дневное время. В процессе исследований было проведено 9 экспериментов при постепенном изменении периода поступления заявок в систему $T_{\text{з}}$ от 100 до 500 мс. Размер выборки в каждом из экспериментов составлял 1000 изображений.

Целью проводимых исследований являлось получение эффективных значений параметров:

- периода поступления заявок в систему $T_{\text{з}}$;
- размера буферов С1 и С2 – I_1 и I_2 соответственно;
- максимально допустимого времени простоя 2-й и 3-й фаз СМО – $\max t_{\text{пр}2}$ и $\max t_{\text{пр}3}$ соответственно.

В ходе исследований был определен оптимальный период поступления заявок, составивший $T_{\text{з}} = 400$ мс. При этом среднее время пребывания заявок в системе составило $T_{\text{оср}} = 551$ мс. Значения остальных параметров: среднее время ввода изображений в генераторе заявок $T_{\text{Г}} = 123$ мс; среднее

время обработки заявок на соответствующих фазах СМО $T_{\phi 2} = 194$ мс, $T_{\phi 3} = 167$ мс; среднее время ожидания заявок в соответствующих буферах $T_{C1} = 50$ мс, $T_{C2} = 17$ мс; среднее время простоя соответствующих фаз системы $T_{np2} = 254$ мс, $T_{np3} = 279$ мс.

Значения временных критериев для 2-й и 3-й фаз СМО составили:

$$F_{22} = M[\tau_{одс}] + M[\tau_{ож}] = T_{\phi 2} + T_{C1} = 194 + 50 = 244 \text{ мс},$$

$$F_{23} = M[\tau_{одс}] + M[\tau_{ож}] = T_{\phi 3} + T_{C2} = 167 + 17 = 184 \text{ мс}.$$

Таким образом, значения временных параметров обработки заявок в разработанной СМО являются удовлетворительными для большинства задач, связанных с обнаружением подвижных объектов.

Кроме того, в ходе исследований были определены эффективные размеры буферов С1 и С2, составившие $l_1 = 5$ заявок, $l_2 = 3$ заявки; а также максимально допустимое время простоя фаз СМО: $\max t_{np2} = 2 \cdot T_{\phi} = 800$ мс, $\max t_{np3} = 3 \cdot T_{\phi} = 1200$ мс.

Для исследования работоспособности и эффективности предложенных алгоритмов было разработано соответствующее программное обеспечение (ПО). В диссертации приведена структура ПО и основные параметры используемых для его реализации аппаратных средств. Данное ПО разрабатывалось в рамках объектно-ориентированного программирования на языке C++, ориентировано на работу в многозадачной среде, имеет модульную структуру и обладает возможностью дальнейшего наращивания.

В четвертой главе диссертации описываются результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмов в лабораторных условиях и на реальных рабочих сценах. Использувавшаяся лабораторная установка позволяет моделировать движение одного или нескольких объектов с разными скоростями и изменять освещение рабочей сцены по желанию оператора.

В ходе испытаний алгоритма автоматической настройки системы по яркости исследовалась реакция СТЗ на изменение освещенности рабочей сцены. Испытания показали, что разработанный алгоритм способствует устойчивому обнаружению объектов наблюдения, обеспечивая значения яркости и, по возможности, контрастности изображений в заданных интервалах. При этом для подстройки системы по яркости в процессе работы необходимо 2-3 видеокадра (1-2 шага), что составляет $F_{21} = M[\tau_{\text{н}}] \leq 180$ мс.

Значение параметра λ_{12} (меры контрастности изображения) может не попадать в заданный интервал из-за сильной засветки или затемнения изображения. Как показали испытания, с уменьшением освещенности рабочей сцены объект продолжает устойчиво обнаруживаться системой до тех пор, пока значение параметра λ_{12} не становится равным $\lambda_{12} \leq 8$. Начиная с этого значения освещенности для работы СТЗ становится недостаточно и выдается сигнал о необходимости включения дополнительной подсветки.

На рис. 2 показаны результаты вычитания двух изображений, полученных до и после настройки СТЗ по яркости. Как видно из рисунка, в результате работы алгоритма настройки площадь следа объекта увеличилась, что упрощает его обнаружение на последующих этапах, несмотря на увеличение количества помех.

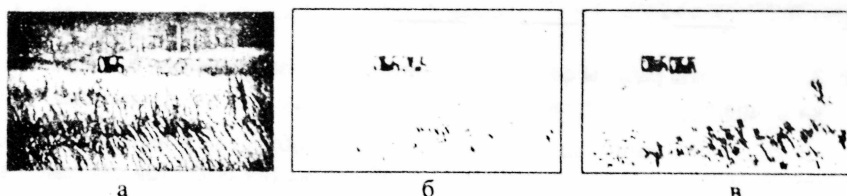


Рис. 2. Результат вычитания двух изображений: а – исходное изображение, б – результат вычитания до настройки СТЗ, в – после настройки СТЗ.

В ходе испытаний алгоритмов этапа предобработки оценивалась эффективность и качество их работы в условиях сложного фона. Результаты этих испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Количество удаленных пятен в результате работы адаптивного фильтра.

	Кол-во "больших" пятен	Кол-во "средних" пятен	Кол-во "мел- ких" пятен	Кол-во "оч. мелких" пятен	Общее кол-во пятен	Кол-во проходов фильтрации
сцена 1	0%	27%	40%	99%	97%	1
сцена 2	-	0%	0%	30%	17%	0
сцена 3	7%	33%	69%	99%	97%	2
сцена 4	0%	31%	24%	77%	57%	1
сцена 5	0%	0%	78%	97%	89%	1
сцена 6	0%	13%	38%	34%	18%	0

Как показали эксперименты, в большинстве случаев адаптивный фильтр удаляет более 90% помех при общем количестве проходов не более 5-ти. Нулевое количество проходов фильтрации в случаях 2-й и 6-й рабочей сцен означает, что количество помех, остающееся на изображении после вычитания, невелико и фильтровать такое изображение не имеет смысла.

При сравнении результатов работы процедуры адаптивной фильтрации и жестко заданного медианного фильтра с апертурой 3×3 было установлено, что при использовании процедуры адаптивной фильтрации качество предобработки увеличивается на 30-40% при незначительном увеличении времени работы. Сравнительные результаты работы адаптивного и медианного фильтров приведены на рис. 3. Как можно видеть, после обработки изображения адаптивным фильтром помехи исчезли полностью, в то время, как после его обработки медианным фильтром большинство помех осталось.

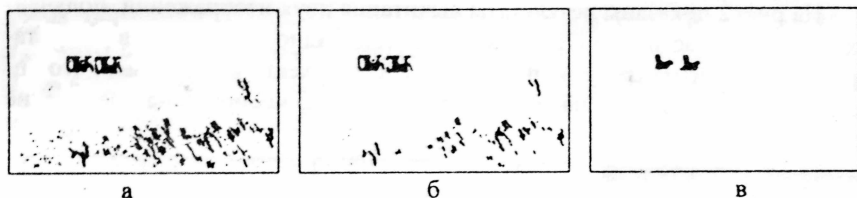


Рис. 3. Результаты работы фильтров: а – исходное изображение, б – обработка медианным фильтром 3×3 , в – обработка адаптивным фильтром.

В ходе испытаний алгоритма обнаружения объектов и вычисления их характеристик оценивалась устойчивость обнаружения объектов системой в условиях сложного фона и точность вычисления их характеристик. В результате испытаний было установлено, что искажения вычисляемых координат и скорости движения объекта на границах зоны видимости телекамеры составляют не более 8% от всего поля зрения; в остальной части рабочей сцены, благодаря использованию фильтра Калмана, дисперсия вычисляемых характеристик уменьшилась в 4 раза. Использование процедуры прогнозирования текущего местонахождения объекта в случае его внезапной потери позволило сохранить непрерывность траектории движения объекта в процессе работы СТЗ. При отсутствии этого алгоритма СТЗ необходимо вновь накапливать информацию об объекте после его появления на изображении, происходит срыв слежения в течении 1,5 с. Кроме того, результаты испытаний СТЗ показали, что она способна работать с несколькими подвижными объектами одновременно, при условии, что каждый из них появляется на изображении не менее 5 раз и следы их движения после обнаружения системой перекрываются в течение не более 2 тактов.

На рис. 4 представлены сравнительные результаты работы СТЗ с использованием алгоритмов адаптации системы к внешним условиям и без них. Испытания проводились на реальных рабочих сценах, представляющих собой отрезки проезжей части вместе с прилегающим тротуаром, при этом объектами наблюдения считались люди и машины, попавшие в поле зрения телекамеры. В процессе испытаний объекты двигались произвольно, траектории их движения могли пересекаться. Объекты могли поворачивать, останавливаться, менять направление своего движения, кроме того их количество на сцене постоянно менялось. Как видно из приведенных результатов, использование алгоритмов адаптации (автоматической настройки, адаптивной фильтрации и прогнозирования траектории движения объектов) существенно повышает устойчивость обнаружения малоконтрастных объектов на сложном фоне: количество и величина разрывов полученных траекторий уменьшилось. Для адаптивной СТЗ вероятность ошибки первого рода (потери объекта) составила $P_I = 7\%$, вероятность ошибки второго рода (идентификации помехи как объекта наблюдения) составила $P_{II} = 4\%$. Для аналогичной, но не адаптивной СТЗ эти вероятности составили: $P_I = 23\%$, $P_{II} = 16\%$.

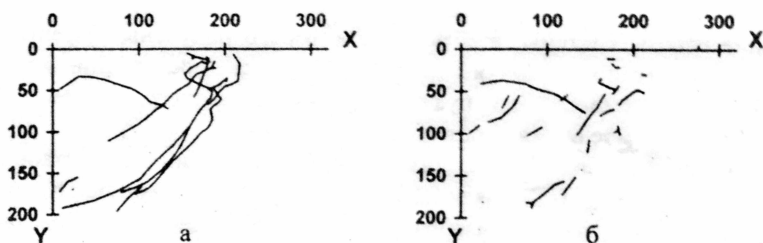


Рис. 4. Результаты работы СТЗ в реальных условиях: а – адаптивная СТЗ, б – СТЗ без использования алгоритмов адаптации.

Таким образом, проведенные эксперименты доказывают работоспособность разработанных алгоритмов и подтверждают теоретические положения диссертации.

В приложении к диссертации приведены графики с результатами исследований; блок-схемы разработанных алгоритмов; список фильтров, находящихся в библиотеке СТЗ; распечатки заголовочных файлов ПО, содержащие описания классов; формат файла конфигурации СТЗ; представлен акт внедрения результатов диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований получены следующие научно-технические результаты:

1. Разработан алгоритм автоматической настройки системы по яркости, позволяющий адаптировать СТЗ в процессе ее работы к изменениям освещенности за минимальное количество итераций – не более 2-х. Предложена методика исследования платы видеоввода с целью настройки разработанного алгоритма под конкретное аппаратное обеспечение.

2. Разработан комплекс адаптивных алгоритмов предобработки видеoinформации, позволяющий в процессе работы СТЗ выбирать наиболее эффективную последовательность фильтров для каждого поступающего изображения, что улучшает качество фильтрации на 30-40 % по сравнению с обычными методами. Предложена методика объективной оценки качества работы фильтров исходя из условий работы системы.

3. Разработан алгоритм обнаружения подвижных объектов в условиях сложного фона, позволяющий повысить устойчивость обнаружения объектов наблюдения в 3-4 раза: при использовании алгоритмов адаптации СТЗ к внешним условиям вероятность ошибки первого рода составила $P_I = 7\%$, вероятность ошибки второго рода – $P_{II} = 4\%$; без использования этих алгоритмов – $P_I = 23\%$, $P_{II} = 16\%$ соответственно.

4. Предложена модель СТЗ в виде 3-х фазной системы массового обслуживания, обеспечивающая параллельное функционирование разработанных алгоритмов в составе системы оптимальным образом. Проведено моде-

лирование работы системы, в результате которого получены эффективные параметры функционирования системы: частота поступления заявок-изображений в систему, длины буферов для хранения очередей заявок, максимально допустимое время простоя фаз системы.

5. Для проведения экспериментальных исследований разработано программное обеспечение СТЗ как многозадачной системы. Данное ПО проверено на моделях и реальных изображениях, и его можно использовать для решения задач обнаружения подвижных объектов в условиях сложного фона.

6. Проведено экспериментальное исследование разработанного ПО, подтвердившее работоспособность и эффективность предложенных методик и алгоритмов.

Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы для широкого круга задач, связанных с обнаружением подвижных объектов: для управления роботом при операциях с деталями, движущимися на конвейере, в качестве самостоятельного блока в охранных системах или системах слежения за трафиком на железных дорогах и шоссе, а также в ряде военных задач. Это позволит уменьшить количество ложных срабатываний СТЗ и повысить устойчивость ее работы в экстремальных условиях.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Копылов Ю. В., Михайлов Б. Б., Цветков Г. Г. Алгоритмы фильтрации и определения параметров подвижных объектов системой технического зрения в экстремальных условиях // Экстремальная робототехника: VII Всероссийская научно-техническая конференция. – СПб., 1996. – С. 244-251.

2. Копылов Ю. В. Предварительная обработка изображений в промышленных СТЗ // Контроль и диагностика: Тез. докл. 14 Российской Научно-технической Конференции. – М., 1996. – С. 316.

3. Копылов Ю. В. Предварительная обработка изображений в условиях сложной помеховой обстановки // Технические средства изучения и освоения океанов и морей. Состояние и перспективы: Тез. докл. Международной конференции-школы. – М., 1996. – С. 27.

4. Копылов Ю. В., Михайлов Б. Б. Алгоритмическое обеспечение системы обнаружения подвижных объектов // Прикладная физика. – 1996. – Вып. 4. – С. 80-89.

5. Копылов Ю. В. Адаптивный фильтр для задач автоматического обнаружения и классификации подвижных объектов // Экстремальная робототехника: VIII Всероссийская научно-техническая конференция. – СПб., 1997. – С. 331-334.

6. Копылов Ю. В. Автоматическая СТЗ для обнаружения подвижных объектов как оптимальная система массового обслуживания // Экстремальная робототехника: X Всероссийская научно-техническая конференция. – СПб, 1999. – С. 358-365.