

На правах рукописи



Михальков Федор Дмитриевич

Прецизионные быстродействующие мобильные
видеоинформационные системы дополненной реальности

Специальность 05.12.04 – радиотехника,
в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

**Научный
руководитель:**

Курячий Михаил Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры телевидения и управления ТУСУР, г. Томск.

**Официальные
оппоненты:**

Сай Сергей Владимирович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой вычислительной техники ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск;

Спицын Владимир Григорьевич, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет", г. Томск.

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), г. Новосибирск.

Защита состоится 21 декабря 2016 г. в 11 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д212.268.01 на базе ТУСУР по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <https://tusur.ru/ru/nauka-i-innovatsii/podgotovka-kadrov-vysshey-nauchnoy-kvalifikatsii/ob-yavleniya-o-zaschitah-dissertatsiy/dissertatsiya-pretzionnye-bystrodeystvuyushie-mobilnye-videoinformatsionnye-sistemy-dopolnennoy-realnosti> и в библиотеке ТУСУР по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146.

Автореферат разослан «__» ноября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.268.01,
доктор физико-математических наук



А.Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одной из современных тенденций в телевидении является распространение технологии дополненной реальности и созданных на ее основе видеоинформационных систем. Дополненная реальность – это технология, позволяющая совмещать объекты реального мира и виртуальные объекты, а также обеспечивающая их взаимодействие. Задача дополненной реальности – расширить взаимодействие пользователя с окружающим миром, в отличие от виртуальной реальности, которая изолирует взаимодействие с окружением и переносит его в искусственную среду.

В настоящее время технология дополненной реальности стремительно развивается и находит применение в самых разных областях деятельности человека: в медицине, обучении, развлечениях, инженерии. Использование технологии дополненной реальности для решения повседневных задач стало возможным с появлением цифровых мобильных устройств – смартфонов и планшетных компьютеров, быстродействие которых позволило обеспечить человеко-машинное взаимодействие в режиме реального времени.

С самого создания видеоинформационных систем дополненной реальности ведется борьба за быстродействие в обработке входного видеоряда и распознавании образов. Опубликовано множество работ по повышению качества и скорости распознавания образов на изображении, в том числе и в системах дополненной реальности, например, работы таких специалистов, как: S. Mann, R. Azuma, H. Kato, A.B. Козырева, M. Tikander, S. Junding, D.Schmalstieg, T. Hollerer, Ф. А. Мурзин, C. Harris, D. Lowe, C. Tomasi, T. Kanade, J. Lima, S. Hinterstoisser, X. Ren, S. Holzer.

Однако ряд вопросов в обозначенном выше направлении остается нерешенным. Во многих работах предлагаемые алгоритмы и способы распознавания образов на изображениях не учитывают ограниченные вычислительные возможности мобильных цифровых устройств, и как следствие – требуют больших вычислительных затрат, что приводит к большому энергопотреблению, тепловыделению и снижению длительности работы без заряда батарей.

Цель работы – повышение точности и быстродействия мобильных видеоинформационных систем дополненной реальности (МВИС ДР). Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи: повысить быстродействие детекторов особых точек, применяемых в видеоинформационных системах дополненной реальности; предложить способ построения дескриптора локальной особенности изображения с субпиксельной точностью, обладающий минимальной длиной и не требующий значительных вычислительных ресурсов; экспериментально установить устойчивость предложенного дескриптора к различным искажениям, возникающим в МВИС ДР; предложить способ сравнения предложенных дескрипторов локальных особенностей изображения для мобильных видеоинформационных систем дополненной реальности, не требующий значительных вычислительных ресурсов и оценить время, требуемое для сравнения дескрипторов.

Научная новизна

1. Предложен способ уменьшения длительности процесса выделения локальных особенностей изображения с помощью детекторов углов путем применения яркостного предварительного детектора.

2. Впервые оценено влияние аффинных преобразований изображения и распространенных искажений на характеристики предложенного яркостного предварительного детектора.

3. Предложена аналитическая модель дескриптора локальных особенностей изображения для применения в мобильных видеоинформационных системах дополненной реальности, отличающаяся субпиксельной точностью.

4. Впервые предложен алгоритм сравнения предложенных дескрипторов локальных особенностей изображения, основанный на кросскорреляционном анализе, и выполнена оценка эффективности его применения.

5. Впервые оценено влияние аффинных преобразований изображения и распространенных искажений на предложенный алгоритм сравнения дескрипторов локальных особенностей изображения.

Теоретическая значимость

1. Предложенный алгоритм яркостного предварительного детектора позволяет расширить применение детекторов углов в видеоинформационных системах дополненной реальности.

2. Получена аналитическая модель дескриптора локальной особенности изображения для использования в мобильных видеоинформационных системах дополненной реальности.

3. Предложенный способ сравнения описанных в диссертации дескрипторов локальных особенностей изображения, основанный на кросскорреляционном анализе, может применяться для решения задачи сопоставления изображений.

Практическая значимость

1. Измерена устойчивость предложенного яркостного предварительного детектора к аффинным преобразованиям и искажениям.

2. Экспериментально подтверждено уменьшение длительности процесса выделения локальных особенностей изображения при использовании яркостного предварительного детектора.

3. Обоснована возможность применения предложенного алгоритма сравнения дескрипторов локальных особенностей изображения в мобильных видеоинформационных системах дополненной реальности.

4. Оценено быстродействие предложенного алгоритма сравнения дескрипторов локальных особенностей изображения.

5. Измерена устойчивость предложенного алгоритма сравнения дескрипторов локальных особенностей изображения к аффинным преобразованиям и искажениям.

6. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенные алгоритмы.

7. Даны практические рекомендации для использования яркостного предварительного детектора, дескрипторов локальных особенностей изображения и способа их сравнения в мобильных видеоинформационных системах дополненной реальности.

Методология и методы исследования

В настоящей диссертационной работе применены методы цифровой обработки изображений и распознавания образов, математической статистики, структурного и объектно-ориентированного программирования, эмуляционного и имитационного моделирования.

Достоверность результатов

Достоверность результатов высока, поскольку основана на высокой повторяемости результатов и использовании результатов на практике.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложен алгоритм яркостного предварительного детектора, позволяющий сократить время выделения локальных особенностей изображения с помощью различных детекторов углов, что подтверждается результатами эмуляционного вычислительного эксперимента: длительность выделения локальных особенностей тестового изображения детектором Харриса была уменьшена в 220 раз при его использовании совместно с предложенным яркостным предварительным детектором.

2. Разработана аналитическая модель дескриптора локальных особенностей изображения для применения в мобильных видеоинформационных системах дополненной реальности, отличающаяся субпиксельной точностью.

3. Предложенный алгоритм сравнения дескрипторов локальных особенностей изображения, основанный на кросскорреляционном анализе, пригоден для использования в мобильных видеоинформационных системах и демонстрирует устойчивость к малым аффинным преобразованиям (поворот до 15 градусов, масштабирование до 1,25 раз) и распространённым искажениям (нормально распределённый шум со среднеквадратичным отклонением до 0,03; размытие Гаусса с радиусом до 5 пикселей).

Использование результатов исследования

1. «Исследование и разработка методов и средств повышения качества изображений в активно-импульсных телевизионно-вычислительных системах видения в сложных метеоусловиях и малопрозрачных средах» (код проекта 3643), в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России 2014/225.

2. Дисциплина «Языки программирования для обработки сигналов и изображений», предусмотренная учебным планом подготовки магистров по направлению 11.04.01 «Радиотехника» (магистерская программа «Видеоинформационные технологии и цифровое телевидение»).

3. Дисциплина «Технология разработки программного обеспечения», предусмотренная учебным планом подготовки магистров по направлению 09.04.01 «Информатика и

вычислительная техника» (магистерская программа «Автоматизация проектирования микро- и нанoeлектронных устройств для радиотехнических систем»).

4. Мобильные видеoinформационные системы широкого применения, разрабатываемые в ООО «Арвью», г. Томск.

Апробация результатов

Результаты исследования доложены и обсуждены на 5 международных и 1 всероссийской научных конференциях:

1. IX Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», Томск, ТУСУР (2013 г.).

2. XX Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, ТПУ (2014 г.).

3. X международная конференция «Электронные средства и системы управления», Томск, ТУСУР (2014г.).

4. XIX Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР - 2014», Томск, ТУСУР (2014 г.).

5. XII международная конференция «Телевидение - передача и обработка изображений», Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (2015 г.).

6. XVII Международная конференция молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам EDM-2016, Эрлагол, НГТУ (2016г.).

Публикации

По результатам исследования опубликовано 11 работ (6 работ без соавторов): 4 статьи в журналах из перечня ВАК, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 4 публикации в сборниках трудов международных и всероссийских конференций.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в постановке целей и задач исследования, планировании и проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации полученных данных, формулировании выводов, реализации программного обеспечения, подаче заявок на регистрацию программ для ЭВМ, подготовке к публикации докладов и статей. Все результаты получены автором

лично или совместно с соавторами при его непосредственном участии.

Краткое содержание работы

Во введении представлена краткая характеристика работы. В главе 1 выполнен аналитический обзор литературы актуальных задач по направлению исследования. В главе 2 представлены исследования направленные на оптимизацию быстродействия детекторов углов в видеоинформационных системах дополненной реальности. В главе 3 представлены результаты разработки упрощенного дескриптора локальных особенностей изображения и методов их сравнения, а также представлен способ сравнения дескрипторов, основанный на статистическом анализе их упрощенных моделей. В главе 4 описано разработанное программное обеспечение для выделения локальных особенностей изображения и измерения их характеристик. В главе 5 приведены результаты практического применения результатов диссертационной работы. Далее приведён список литературы. В приложении представлены копии документов (свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, актов использования результатов работы).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы.

1 ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

В данной главе проведен аналитический обзор литературы, дано определение термину дополненная реальность, приведена классификация систем дополненной реальности и краткая история их развития. Также были выделены основные задачи, решаемые при реализации таких систем и определены основные сложности при их решении. Было произведено сравнение наиболее часто используемых детекторов и дескрипторов локальных особенностей изображения, определены их достоинства и недостатки. Сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

2 ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРОВ ЛОКАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ОСНОВАННЫХ НА ПРИНЦИПЕ ВЫДЕЛЕНИЯ УГЛОВ

Данная глава посвящена оптимизации детекторов локальных особенностей изображения (ДЛОИ) для их последующего

применения в мобильных видеоинформационных системах дополненной реальности.

Приведен основной алгоритм определения изменения положения наблюдающей камеры в пространстве, используемый в видеоинформационных системах дополненной реальности (рисунок 1).

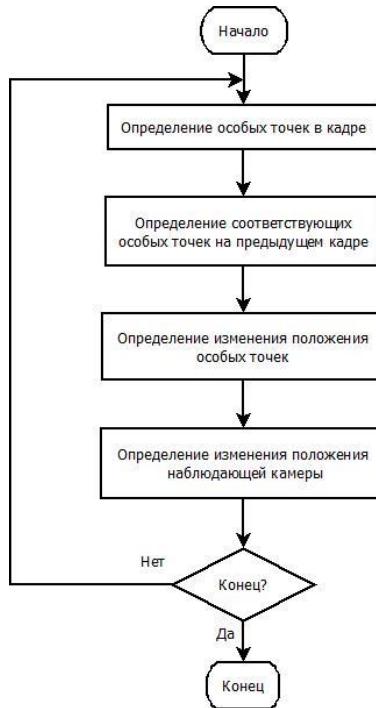


Рисунок 1 – Блок-схема основного алгоритма ВИС ДР, использующих технологию пространственного трекинга

Приведено определение детекторов локальных особенностей изображения и приведена их классификация по типу выделяемых структур – углов и блоков (капель). Приведено основное свойство угловых особенностей изображения.

Далее определена верхняя граница времени обработки одного кадра изображения для обеспечения функционирования видеоинформационных систем дополненной реальности в реальном времени. Для повышения быстродействия детекторов угловых

локальных особенностей предложен алгоритм предварительного выделения потенциальных особенностей изображения, блок-схема которого приведена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Блок-схема основного алгоритма предварительного выделения потенциальных особенностей изображения

Представлена формула, используемая при построении матрицы среднеквадратичных частных производных яркости изображения:

$$S_{x,y} = \sqrt{\left(\frac{dI}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dI}{dy}\right)^2}, \quad (1)$$

где S – матрица среднеквадратичных сумм частных производных яркости изображения. Далее приведена формула порогового значения изменения яркости:

$$d = S_{min} + \left(\frac{S_{max} - S_{min}}{k}\right), \quad (2)$$

где k – эмпирическая константа, значение которой обычно выбирается в диапазоне от 1,4 до 2; S_{min} и S_{max} – минимальное и максимальное значение элемента матрицы S , соответственно. Обоснована формула критерия отбора потенциальных особенностей изображения

$$S_{x,y} \geq d. \quad (3)$$

Приводятся метрики эффективности применения предварительного детектора: изменение длительности обработки кадра при использовании предварительного детектора; изменение количества найденных особых точек на изображении; изменение порогового значения отклика угла для набора точек, найденных детектором Харриса, как без использования предварительного детектора особых точек, так и с его использованием.

Производятся измерения длительности обработки тестового изображения детектором Харриса, как с использованием предварительного детектора, так и без него. Каждое измерение проводилось 1000 раз для уменьшения влияния случайных факторов. Данные измерений приведены в таблице 1. Все вычисления, описываемые далее, производились на компьютере с двухъядерным процессором AMD Athlon II P360 с тактовой частотой 2,3 ГГц.

Таблица 1 – Длительность обработки тестового изображения

Разрешение тестового изображения, пиксели	320x240	640x480	768x576	800x600	1024x768
Математическое ожидание длительности обработки без ЯПД, мс	1386	5681	7839	8439	14006
Дисперсия длительности обработки без ЯПД, мс	102	418	520	589	827
Математическое ожидание длительности обработки с ЯПД, мс	6	24	35	36	70
Дисперсия длительности обработки с ЯПД, мс	3	4	5	6	13

На основании данных измерений был построен график зависимости длительности обработки изображения от количества

точек изображения, изображенный на рисунке 3. Полученная зависимость для выбранного вычислителя является линейной и приближенно описывается формулой

$$t(N) = 9 \cdot 10^{-5} N,$$

где N – число элементов изображения.

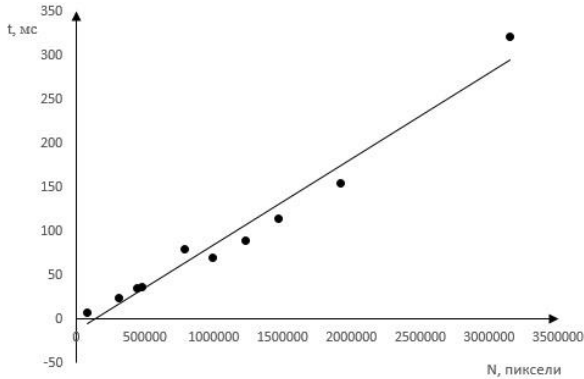


Рисунок 3 – Зависимость длительности обработки изображения от количества точек

Из результатов измерений следует, что использование яркостного предварительного детектора позволило сократить время обработки одного кадра в среднем в 220 раз.

Приведены результаты измерения влияния яркостного предварительного детектора на количество найденных локальных особенностей изображения. Был произведен подсчет найденных на тестовом изображении особых точек детектором Харриса с предварительным детектированием и без него.

Сделан вывод о том, что использование яркостного предварительного детектора значительно сокращает количество выделенных особенностей изображения. Причина сокращения количества выделенных локальных особенностей заключается в том, что предварительный детектор отсекает углы с незначительно выраженным градиентом интенсивности изображения, оставляя только те, которые обладают перепадом яркости выше порогового значения (3).

Приведены результаты измерения влияния использования яркостного предварительного детектора на отклик угла найденных

особых точек. Были взяты копии тестового изображения в различных разрешениях, которые были проанализированы детектором Харриса с использованием яркостного предварительного детектора и без него. У полученных множеств выделенных особенностей изображения было измерено максимальное и минимальное значение отклика угла, затем на основе этих измерений было рассчитано пороговое значение отклика.

Сделан вывод о том, что использование яркостного предварительного детектора локальных особенностей изображения существенно сокращает время выделения локальных особенностей изображения, что позволяет использовать детекторы углов в видеоинформационных системах дополненной реальности, работающих в реальном времени. Снижение меры отклика угла в выделенных локальных особенностях объяснено непопаданием некоторых локальных особенностей во множество точек, выделяемых предварительным детектором, что приводит к изменению порогового значения отклика угла.

В качестве критериев устойчивости выделяются две характеристики набора обнаруженных особенностей: количество и повторяемость (т.е. выделение одинаковых особых точек на исходном и обработанном изображении).

В ходе эксперимента на эталонное изображение накладывался нормально распределенный шум со среднеквадратическим отклонением от $\sigma=0,03$ до $\sigma=0,3$ с шагом равным $0,03$, после чего измерялись предложенные критерии устойчивости. На основании полученных данных построен график, представленный на рисунке 4.



Рисунок 4 – Зависимость повторяемости от параметров нормально распределенного шума

В ходе эксперимента на эталонное изображение накладывалось размытие Гаусса с радиусом от 1 до 10 с шагом 1, после чего

исходное и обработанное изображения обрабатывались модифицированным детектором Харриса с предварительным выделением особых точек, затем на основе полученных данных рассчитывалась повторяемость. График зависимости повторяемости от радиуса размытия Гаусса представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Зависимость повторяемости от параметров размытия Гаусса

Сделан вывод о том, что яркостный предварительный детектор локальных особенностей обладает достаточной повторяемостью при анализе изображений, подверженных размытию Гаусса. Отмечено, что предварительный детектор допускает большое число ложных срабатываний при увеличении радиуса размытия, что ведет к увеличению длительности обработки кадра.

Сделан вывод о том, что предварительный детектор может применяться для анализа изображений, подверженных нормально распределенному шуму или размытию Гаусса. Отмечено, что не рекомендуется использование предварительного детектора при среднеквадратичном отклонении шума большим, чем 0,09. При увеличении значения среднеквадратичного отклонения предварительный детектор выделяет особенности изображения, являющиеся шумом, увеличивая время анализа кадра. Размытие Гаусса менее выражено влияет на повторяемость выделяемых особенностей, при увеличении радиуса размытия снижается повторяемость выделяемых особенностей.

3. СПОСОБ ОПИСАНИЯ И СРАВНЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ВИС ДР

В главе 3 приведены требования, предъявляемые к особым точкам изображения: отличимость, инвариантность, стабильность, уникальность, интерпретируемость, повторяемость, отличительность, локальность, количество, точность, эффективность.

Приведены особенности обработки и анализа изображений в мобильных видеоинформационных системах реального времени: малые межкадровые аффинные преобразования и ограниченность вычислительных ресурсов.

Описывается применение алгоритма измерения параметров малоразмерных объектов с использованием «сигнально-фоновой» окрестности для определения центра локальной особенности изображения P с координатами (p_x, p_y) с субпиксельной точностью.

Приведена формула, используемая для измерения координаты особой точки по строке:

$$\Delta X = \frac{\sum_{(n,m) \in Sf} nB(n, m) - \sum_{(n,m) \in Sb} f(n, m)B(n, m)}{\sum_{(n,m) \in Sf} B(n, m) - \sum_{(n,m) \in Sb} v(n, m)B(n, m)}, \quad (4)$$

где Sf, Sb – области значений (n, m) , соответствующих сигнальной и периферийной частям окрестности соответственно; $f(n, m), v(n, m)$ – весовые функции, вид которых выбирается из условия компенсации фоновой составляющей окрестности особой точки.

Приведена модель сигнала изображения для нахождения значений весовых функций $f(n, m)$ и $v(n, m)$:

$$B(n, m) = S(n, m) + Bg_0 + Bg_x n + Bg_y m, \quad (5)$$

где $S(n, m)$ – значение интенсивности пикселя в окрестности особой точки с координатами (n, m) ; Bg_0, Bg_x, Bg_y – параметры сигнала от фона, представляющего наклонную плоскость. Приведены формулы для нахождения значений весовых функций:

$$f(n, m) = \frac{C_f^*}{C_b^*} n, \quad v(n, m) = \frac{C_f}{C_b}, \quad (6)$$

где C_f^*, C_b^*, C_f, C_b – постоянные для заданной формы сигнальной и фоновой окрестностей, определяющиеся через выражения:

$$C_f^* = \sum_{(n,m) \in Sf} n^2, \quad C_b^* = \sum_{(n,m) \in Sb} n^2, \\ C_f = \sum_{(n,m) \in Sf} 1, \quad C_b = \sum_{(n,m) \in Sb} 1.$$

Выражение для ΔY вычисляется аналогично. Далее приведена формула для расчета центра локальной особенности изображения с субпиксельной точностью:

$$P = (p_x + \Delta X, p_y + \Delta Y). \quad (7)$$

Для обеспечения инвариантности к повороту выделяются i (на практике i принимают равным 20) основных равномерно распределенных направлений изменения интенсивности изображения, которые характеризуются на выбранных направлениях, для чего необходимо выделить опорные точки. Приведена формула описывающая поведение интенсивности на выбранных направлениях:

$$R_i = \frac{I'_{2,i} - I'_{1,i}}{l_2}, \quad (8)$$

где $I'_{2,i}, I'_{1,i}$ – производные интенсивности на втором и первом отрезке i -го направления изменения интенсивности; l_2 – расстояние между первой и второй опорными точками на рассматриваемом направлении (рисунок 6). Приведены формулы расчета производных интенсивности по выбранным направлениям:

$$I'_{1,i} = \frac{S(a_{x,i}, a_{y,i}) - S(p_x, p_y)}{l_1}, \quad I'_{2,i} = \frac{S(b_{x,i}, b_{y,i}) - S(a_{x,i}, a_{y,i})}{l_2}, \quad (9)$$

где $S(x,y)$ – интенсивность изображения в точке с координатами (x,y) ; $(a_{x,i}, a_{y,i})$ и $(b_{x,i}, b_{y,i})$ – координаты первой и второй опорной точки по i -му направлению изменения интенсивности; (p_x, p_y) – координаты локальной особенности изображения, измеренные по формуле (7).

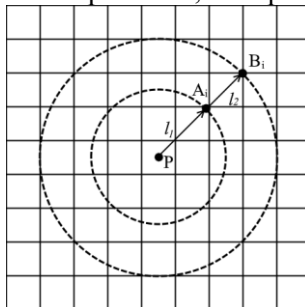


Рисунок 6 – Опорные точки для выбранного направления дескриптора

Отмечается, что расстояния l_1 и l_2 выбраны, с одной стороны, на основании минимизации ошибок интерполяции, а с другой – на основе равномерного описания окрестности особой точки.

Определяется задача минимизации ошибок интерполяции как задача минимизации отклонения координат опорных точек дескриптора от координат изображения с известными значениями "цвета" (условно – центра пикселя). На рисунке 7 изображен участок растра изображения с опорной точкой дескриптора P , обладающей нецелочисленными координатами, а также четыре окружающие точки растра с целочисленными координатами (R_1, R_2, R_3, R_4). Отклонение координат от опорной точки определяется как длина наименьшего из векторов от точки P до соседней известной точки.

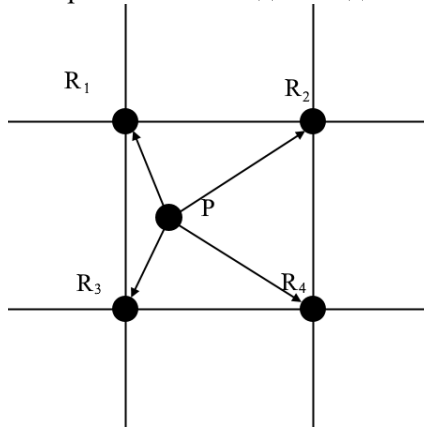


Рисунок 7 – Отклонение координат опорной точки

Приведена формула суммарного отклонения:

$$e(l) = \sum_{i=1..20} \min(|\overline{P_i R_{l,1}}|, |\overline{P_i R_{l,2}}|, |\overline{P_i R_{l,3}}|, |\overline{P_i R_{l,4}}|). \quad (10)$$

Для точек, выбираемых по формуле

$$P_i = (l \cos(i\omega), l \sin(i\omega)), \quad (11)$$

при $i=20$, где $\omega=360/i$, график зависимости суммарного отклонения координат опорных точек от радиуса l представлен на рисунке 8 и достигает локальных минимумов в точках

$$lc_1 = 2.118, \quad lc_2 = 3.174. \quad (12)$$

По выражению (12) значения l_1 и l_2 рассчитываются следующим образом:

$$l_1 = lc_1, l_2 = lc_2 - lc_1. \quad (13)$$

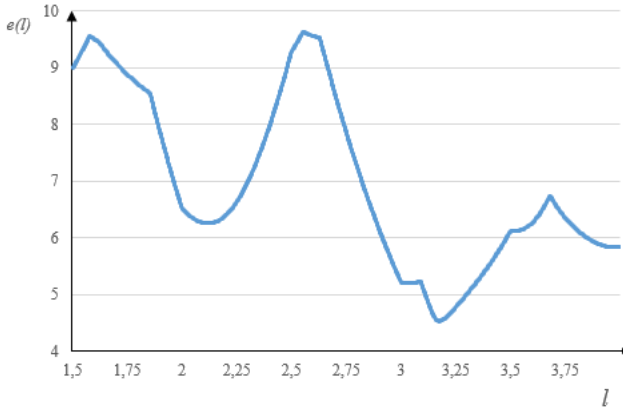


Рисунок 8 – График зависимости отклонения координат опорных точек

Для построения вектора-дескриптора локальной особенности изображения используются выражения (9), (13) и (8). Итоговое выражение принимает следующий вид:

$$\bar{v}_i = \frac{l_1 \left(S(p_{2,i_x}, p_{2,i_y}) - S(p_{1,i_x}, p_{1,i_y}) \right) - l_2 \left(S(p_{1,i_x}, p_{1,i_y}) - S(p_x, p_y) \right)}{l_1 l_2^2}, \quad (14)$$

где (p_{1,i_x}, p_{1,i_y}) и (p_{2,i_x}, p_{2,i_y}) – координаты опорных точек, отстоящих от локальной особенности на lc_1 и lc_2 соответственно, рассчитываемые по выражению (11); (p_x, p_y) – координаты локальной особенности.

Для сравнения двух дескрипторов особых точек предлагается представить дескрипторы в виде периодических дискретных сигналов, взаимное расположение которых будет определяться поворотом окрестности изображения.

Для определения степени схожести дескрипторов определяется взаимная корреляционная функция для двух периодических дискретных сигналов S и U с периодом t и сдвигом сигнала U относительно S на τ отсчетов назад:

$$Cor_{SU}(\tau) = \sum_t S(t) \cdot U(t - \tau). \quad (15)$$

Приведено выражение для расчета вектора корреляции

$$\overline{V_{SU\tau}} = Cor_{SU}(\tau), \tau \in [1..i]. \quad (16)$$

Указывается, что максимальный элемент вектора корреляции показывает степень похожести сигналов дескрипторов особых точек изображения, а соответствующий ему отсчет – поворот окрестности первого дескриптора относительно окрестности второго при достижении максимального подобия.

Для сравнения двух дескрипторов особых точек вводится мера подобия – функция взаимных корреляционных коэффициентов

$$\rho_{SU}(\tau) = \frac{C_{SU}(\tau)}{\sigma_S \sigma_U}, \quad (17)$$

где σ_S и σ_U – среднеквадратическое отклонение сигналов S и U соответственно, τ – отсчет при котором подобие сигналов максимально, а $C_{su}(\tau)$ – центрированное значение сигналов

$$C_{SU}(\tau) = \sum_t (S(t) - \mu_S) \cdot U(t - \tau), \quad (18)$$

где μ_S – среднее значение сигнала $S(t)$.

Для нормирования используется функция автокорреляционных коэффициентов сигнала S

$$\rho_S = \frac{C_S(0)}{\sigma_S^2}. \quad (19)$$

Для получения коэффициента подобия выражение (17) нормируется по (19):

$$\rho = \frac{\rho_{SU}(\tau)}{\rho_S}, \quad (20)$$

область значений которого лежит в пределах от -1 до 1, где значение -1 соответствует полной обратной корреляции, а значение 1 означает полное совпадение сигналов.

Было произведено измерение быстродействия на компьютере с двухъядерным процессором AMD Athlon II P360 с тактовой частотой 2,3 ГГц. Сравнивались 1000 сгенерированных случайным образом векторов-дескрипторов, измерена общая длительность процедуры сравнения, которая составила 21, 546 мс. Таким образом, средняя длительность процедуры сопоставления двух векторов-дескрипторов предложенным алгоритмом на выбранном вычислителе составляет приблизительно 21 мкс.

Были проведены оценки влияния аффинных преобразований и оптических искажений на используемое тестовое изображение.

Для оценки влияния аффинных преобразований были сопоставлены исходное тестовое изображение и изображения, подвергнутые повороту (с шагом 3 градуса) и масштабированию (с шагом 5%). Для каждого сопоставления замерялось количество совпадающих дескрипторов и количество ложно совпадающих дескрипторов.

На основании полученных данных сделан вывод о том, что предложенный дескриптор обладает достаточной инвариантностью к масштабированию (до 1,25 раз) и повороту изображения (до 15 градусов), что позволяет использовать его в мобильных видеоинформационных системах дополненной реальности.

Для оценки влияния оптических искажений были сопоставлены исходное тестовое изображение и изображения с наложенным нормально распределенным шумом и размытием Гаусса (с радиусом от 1 до 7 пикселей). Для каждого сопоставления замерялось количество совпадающих дескрипторов и количество ложно совпадающих дескрипторов. Данные измерений влияния размытия Гаусса на количество верно определенных дескрипторов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерений влияния размытия Гаусса

Радиус размытия	Количество совпавших дескрипторов	Количество ложно совпавших дескрипторов	Процент верно определенных совпадений
1	95	6	95
2	36	5	86
3	34	7	79
4	24	3	85
5	21	5	88
6	32	11	66
7	43	18	58

На основании полученных данных сделан вывод о том, что предложенный способ описания и сопоставления особых точек применим только для слабозашумленных изображений. В то же время отмечено, что предлагаемый способ продемонстрировал приемлемую устойчивость для размытых изображений с радиусом размытия не превышающим 5 пикселей.

4. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОБРАЖЕНИЯ

В главе 4 приведено описание разработанного программного обеспечения для измерения интересных параметров изображений и записи полученных результатов, на которое впоследствии получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ: детектор локальных особенностей изображения с предварительным выделением особых точек; анализатор производительности модулей обработки изображения; определитель изменения положения телевизионной камеры на основе анализа видеопотока. Описываемое программное обеспечение обладает кроссплатформенностью и было протестировано на компьютерах с различными процессорами компаний Intel и AMD под управлением операционных систем Microsoft Windows 10 Professional, Microsoft Windows 7 Professional, Ubuntu Linux 16.04, Slackware Linux 14.2. Программное обеспечение разработано на платформе .NET Framework 4.5.1 с использованием языка программирования C#. Приводится описание разработанных модулей с использованием UML-диаграмм (диаграмм классов и диаграмм вариантов использования).

5 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В главе 5 приводится описание способов применения предварительного детектора локальных особенностей изображения; предложенного дескриптора, а также способа их сравнения при построении мобильных видеоинформационных систем дополненной реальности. Отмечено, что результаты диссертационного исследования использованы в НИР и при создании мобильных видеоинформационных систем дополненной реальности широкого применения, а разработанное программное обеспечение используется для обеспечения учебного процесса, что подтверждается соответствующими актами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы основные результаты работы, подтверждающие достижение цели исследования по повышению точности и быстродействия мобильных видеоинформационных систем дополненной реальности.

1. Применение предложенного яркостного предварительного детектора локальных особенностей изображения совместно с детекторами углов позволяет сократить длительность процесса выделения локальных особенностей изображения, что подтверждается результатами эмуляционного вычислительного эксперимента: использование яркостного предварительного детектора совместно с детектором Харриса позволило сократить длительность выделения особых точек в 220 раз.

2. Модифицированный детектор Харриса обладает устойчивостью к аффинным искажениям и размытию изображений, а также обладает устойчивостью к нормально распределенному шуму, среднеквадратичное отклонение которого не превышает 0,03.

3. Предложен алгоритм построения дескриптора локальной особенности изображения, который не требует значительных вычислительных затрат и является устойчивым к аффинным преобразованиям и размытию с радиусом не превышающим 5 пикселей.

4. Предложен алгоритм сравнения дескрипторов локальных особенностей, основанный на кросскорреляционном анализе и обеспечивающий инвариантность к повороту. Длительность сравнения двух дескрипторов составляет в среднем 21 мкс на используемом вычислителе.

5. Разработано программное обеспечение, реализующее описанные в данной диссертации алгоритмы и демонстрирующее процессы выделения особых точек и сопоставления изображений.

6. Результаты диссертационной работы использованы в НИР и при создании мобильных видеоинформационных систем дополненной реальности широкого применения, а также при обеспечении учебного процесса.

Таким образом, в диссертационной работе в соответствии с сформулированной целью содержится решение задачи по повышению точности и быстродействия мобильных видеоинформационных систем дополненной реальности, имеющих существенное значение для радиотехнической отрасли знаний.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Михальков, Ф.Д. Применение технологии дополненной реальности в пользовательских интерфейсах // Доклады Томского Государственного Университета Систем Управления и Радиоэлектроники. – 2015. – № 1(35). – С. 135-137.

2. Михальков Ф. Д. Оптимизация быстродействия алгоритма детектора Харриса для использования в системах дополненной реальности / Михальков Ф. Д., Курячий М. И. // Вопросы радиоэлектроники, серия Техника телевидения. – 2015. – № 6(23). – С. 84-89.

3. Михальков Ф. Д. Влияние искажений изображения на работу детектора Харриса с предварительным выделением особых точек // Доклады Томского Государственного Университета Систем Управления и Радиоэлектроники. – 2015. – № 3(37). – С. 103-105.

4. Михальков Ф. Д. Инструментальные средства оценки быстродействия и эффективности алгоритмов выделения особых точек изображения // Доклады Томского Государственного Университета Систем Управления и Радиоэлектроники. – 2015. – № 4(38). – С. 171-173.

Патенты и свидетельства

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615035. Детектор локальных особенностей изображения с предварительным выделением особых точек / Ф.Д. Михальков, М.И. Курячий – Заявка №2016612408. Дата поступления 17 марта 2016 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13 мая 2016 г.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016615034. Анализатор производительности модулей обработки изображений / Ф.Д. Михальков, М.И. Курячий – Заявка №2016612448. Дата поступления 17 марта 2016 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13 мая 2016 г.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016614773. Определитель положения телевизионной камеры на основе анализа видеопотока / Ф.Д. Михальков, М.И. Курячий – Заявка №2016612588. Дата поступления 17 марта 2016 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 04 мая 2016 г.

Публикации в трудах конференций

8. Михальков, Ф.Д. Интеграция дополненной реальности в электронные презентации // Современные техника и технологии: сборник докладов XX Международной юбилейной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 2. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2014. – С. 205-206.

9. Михальков, Ф.Д. Определение изменения положения мобильного устройства в пространстве при использовании технологии дополненной реальности // Научная сессия ТУСУР–2014: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: В-Спектр, 2014: В 5 частях. – Ч. 1. – С. 87-89.

10. Михальков Ф. Д. Оценка эффективности использования яркостного предварительного детектора в системах дополненной реальности / Михальков Ф. Д., Курячий М. И. // 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015). – 2015. – Т. 1: 666 с. – С. 261-262.

11. Михальков Ф.Д. Способ описания и сопоставления локальных особенностей изображения с использованием кросскорреляционного анализа // 17-я международная конференция молодых специалистов в микро/нанотехнологиях и электронных приборах EDM. – 2016. – С. 332-335.