

ЯРОСЛАВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. П.Г. ДЕМИДОВА

На правах рукописи



Тюкин Александр Леонидович

**Разработка и анализ алгоритмов цифровой обработки
телевизионных изображений для задач позиционирования
в помещении по маякам с цветовой кодировкой**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.12.04 Радиотехника, в том числе системы и
устройства телевидения

Научный руководитель – д.т.н., профессор Брюханов Юрий Александрович

Ярославль – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ НА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ	14
1.1. Вводные замечания	14
1.2. Телевизионные измерительные системы.....	19
1.2.1. Особенности телевизионных измерительных систем	19
1.2.2. Информативность оптического изображения	22
1.3. Цифровая обработка телевизионных изображений	24
1.3.1. Системы координат	26
1.3.2. Задача распознавания образов	28
1.3.3. Фильтрация телевизионных изображений	33
1.3.4. Цветовая система HSV	34
1.3.5. Искажения при увеличении расстояния	37
1.4. Методы преобразование координат.....	39
1.4.1. Аффинные геометрические преобразования на плоскости....	39
1.4.2. Аффинные преобразования в трехмерном пространстве	44
1.5. Краткие выводы к главе 1	51
2. МЕТОДИКА РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПО МАЯКАМ С ЦВЕТОВОЙ КОДИРОВКОЙ	53
2.1. Вводные замечания	53
2.2. Основные требования к системе и оборудованию	54
2.2.1. Выбор формы маяка и накладываемые ограничения	54
2.2.2. Выбор цветовой схемы маяка и подбор характеристик объектива телекамеры.....	57
2.3. Метод определения координат с помощью маяков с цветовой кодировкой на входном телевизионном изображении.....	58
2.3.1. Структурная схема и описание этапов работы системы позиционирования	58

2.3.2. Описание работы алгоритма распознавания маяков с цветовой кодировкой.....	60
2.3.3. Описание работы алгоритма позиционирования	69
2.4. Усовершенствование алгоритма распознавания цветowych маяков..	76
2.5. Требования при реализации системы позиционирования	80
2.6. Краткие выводы к главе 2.....	82
 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ	 84
3.1. Вводные замечания	84
3.2. Методы преобразования координат системы позиционирования при проведении исследований.....	89
3.3. Анализ параметров освещения, влияющих на работу алгоритма распознавания	91
3.3.1. Изучение влияния типа освещения на работу алгоритма	91
3.3.2. Изучение влияния освещенности на работу алгоритма	94
3.4. Анализ пространственных параметров, влияющих на работу алгоритма распознавания.....	99
3.4.1. Изучение влияния угла поворота маяка на работу алгоритма	99
3.4.2. Изучение влияния расстояния между маяком и камерой на работу алгоритма	103
3.4.3. Изучение влияния скорости движения маяка на работу алгоритма	108
3.5. Анализ работы алгоритма позиционирования при распознавании двух и трёх маяков на входном телевизионном изображении.....	109
3.5.1. Исследование работы алгоритма позиционирования по двум маякам при различных методах преобразования координат	109
3.5.2. Исследование работы алгоритма позиционирования по трем маякам при различных методах преобразования координат	113
3.6. Анализ параметров, влияющих на производительность системы .	116
3.6.1. Исследование производительности алгоритма распознавания при использовании одного маяка.	116
3.6.2. Исследование производительности системы позиционирования при использовании двух маяков.....	117

3.6.3. Исследование производительности алгоритма позиционирования при использовании трёх маяков.	119
3.7. Краткие выводы к главе 3.....	120
4. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ШУМА НА РАБОТУ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ	123
4.1. Вводные замечания	123
4.2. Исследование влияния шумов на определение относительных координат одного маяка.....	126
4.3. Исследование влияния шумов на определение абсолютных координат камеры при распознавании двух маяков.....	128
4.4. Исследование влияния шумов на определение абсолютных координат камеры при распознавании трёх маяков	130
4.5. Краткие выводы к главе 4.....	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	138
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ	148

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. На сегодняшний день, разработка систем, решающих проблемы позиционирования внутри зданий, является перспективной и актуальной, но сложной задачей. Для её решения требуется создание карт на основе планов помещений, выбор эффективных алгоритмов позиционирования и создания соответствующей инфраструктуры здания для уверенного позиционирования [89].

Создание систем определения местоположения внутри помещений с приемлемой точностью может сильно продвинуть существующие технологии и прийти к решению таких задач, как навигация внутри помещения, обеспечение пользователя контекстной информацией в текстовом, аудио- или видеоформате, автоматизация работы, замена человеческих ресурсов в простых или опасных для жизни и здоровья задачах при работе в помещении с использованием автономных мобильных платформ [65]. Например, это могут быть задачи автоматизации работы складских терминалов при переносе необходимого товара из одной точки склада в другую. Таким образом, данная сфера науки и техники имеет большой потенциал для создания и развития систем позиционирования внутри помещений.

В настоящее время для решения вопросов позиционирования в помещении создано больше количество систем, работающих на основе разных принципов и с использованием различных типов опорных точек. Но достаточно универсального решения, как, например, в вопросах глобальной спутниковой навигации (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Бейдоу и др.), пока не найдено [19]. Наиболее популярными на сегодняшний день технологиями позиционирования внутри помещений являются:

- метод радиоотпечатков сигналов точек доступа Wi-Fi [11, 48, 50, 69, 90];
- позиционирование по Bluetooth-маякам [9, 10, 20];
- решения на основе радиочастотных меток (RFID-меток) [90];

- ультразвуковое и инфракрасное позиционирование [59, 71].

Позиционирование по Wi-Fi точкам и Bluetooth-маякам имеет высокую погрешность определения местоположения объекта в помещении вследствие сильной подверженности различным радиопомехам от внешних источников, наводок, а также переотражений с наложением радиосигналов друг на друга [34, 59, 71, 77].

Технологии на основе инфракрасных (ИК) и ультразвуковых (УЗ) маяков имеют высокую точность позиционирования, но сильно подвержены помехам: для ИК – это солнечное излучение, люминесцентные лампы и переотражения; для УЗ – отражения и помехи от высокочастотных источников звука.

Анализ существующих систем показал, что наиболее интересной технологией является работа с использованием систем прикладного телевидения. Такие системы работают в видимом диапазоне электромагнитного спектра, который удобен для практического использования в зоне прямой видимости, позволяет четко ориентироваться в пространстве, обладает неплохой помехозащищенностью и в общем случае лишен проблемы переотражения сигнала [11, 48]. Кроме того, для работы в данном диапазоне можно обойтись простой недорогой телекамерой.

В область разработки алгоритмов цифровой обработки телевизионных изображений внесли вклад как отечественные ученые – Ю.Б. Зубарев [57], М.И. Кривошеев, В.П. Дворкович [54, 85], А.В. Дворкович, М.К. Чобану [86], В.Н. Безруков, А.С. Крылов, Ю.С. Бехтин, Ю.С. Радченко, А.Л. Приоров [24, 88], так и зарубежные – R. Gonzalez [51, 80], R. Woods [51], A. Bovik, Y. Neuvo, J. Astola, K. Egiazaryan, M. Nikolova и другие.

Сегодня системы прикладного телевидения применяются во многих сферах жизни [44]. В научной литературе были обнаружены следующие системы позиционирования и ориентации в помещении с использованием систем прикладного телевидения:

1. Система сопровождения ориентира мобильным роботом [17, 18, 60].

2. Система ориентирования по предметам интерьера [13, 21].
3. Ориентация в помещении по QR-кодам [32, 34].
4. Система локализации роботов с цветовыми маяками для управления в киберфутболе [45].
5. Ориентация по цветовым меткам, расположенным на однородном по цвету фоне методами триангуляции [21].

Все перечисленные системы, использующие методы прикладного телевидения, так или иначе, имеют сильную зависимость от внешних условий. В методе 1 решаются задачи сопровождения, т. е. контроль движущейся метки. Система 2 зависит от предметов интерьера, которые могут меняться независимо от системы, что нарушит её работу, также от внешних условий зависят система 4 зависит (от игрового поля) и система 5 (от монотонного фона).

На основании проведенного анализа установлено, что наиболее надежным каналом во многих случаях, особенно при работе в помещении, является оптический. Несмотря на большое количество наработок в данной области, автономной системы позиционирования, которая сможет работать в реальной обстановке без подготовленного фона, не обнаружено.

В связи с этим предложена система прикладного телевидения на основе цифровой обработки изображения для решения задач позиционирования в помещении автономной мобильной роботизированной платформы (МРП). В такой системе, в качестве опорных точек предложено использовать специальные маяки с цветовой кодировкой известного размера с заданными координатами. Цветовая кодировка представляет собой набор областей разного цвета, находящихся в непосредственной близости друг от друга. В отличие от системы [5], такая кодировка является независимой от цветности и текстуры фона. В сравнении с ультразвуковыми, инфракрасными и лазерными маяками маяки с цветовой кодировкой просты в изготовлении и не требуют источников питания, что позволяет им оставаться работоспособными неограниченное время, а приемником оптического

сигнала от маяков может служить обычная цветная телевизионная камера [53].

Основной целью работы является разработка алгоритмов цифровой обработки телевизионных изображений для задач позиционирования в помещении, с помощью монокулярной системы прикладного телевидения по маякам с цветовой кодировкой, для работы в условиях неоднородного фона и изменения освещения.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

- разработка алгоритма реального времени по обнаружению областей заданного цвета на телевизионном изображении методами цифровой обработки в условиях переменного освещения;
- разработка алгоритма по распознаванию маяков с цветовым кодом в условиях неоднородного фона для работы в реальном времени;
- разработка алгоритма цифровой обработки телевизионного монокулярного изображения по расчету расстояния до маяков с цветовым кодом для работы в реальном времени;
- разработка алгоритма реального времени по расчету трёхмерных координат телекамеры на основе опорных маяков на изображении;
- исследование устойчивости разработанного алгоритма позиционирования к изменению условий внешнего освещения;
- исследование устойчивости разработанного алгоритма позиционирования к влиянию шума;
- определение границ работоспособности и применимости алгоритмов.

Объектом исследования являются алгоритмы предобработки изображения, применяемые для обнаружения объектов и изменения их параметров с помощью телевизионной измерительной системы.

Предметом исследования являются разработка и анализ телевизионной измерительной системы с алгоритмами цифровой обработки изображения с целью создания системы позиционирования в помещении.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались современные методы цифровой обработки изображений, технического зрения, распознавания образов, телевизионных измерений, математического анализа и математической статистики. Для практической реализации алгоритмов применялись современные численные методы и методы программирования на языках Matlab и C++.

Научная новизна

Получены следующие новые научные результаты:

1. Разработан алгоритм по распознаванию маяков с цветовым кодом на телевизионном изображении.
2. Разработан алгоритм по расчету координат телекамеры в системе координат помещения методами телевизионных измерений с использованием модели перспективной проекции.
3. Исследовано влияние условий внешнего освещения на работу алгоритма распознавания цветowych маяков.
4. Исследовано влияние шума на алгоритм позиционирования при решении задачи позиционирования в помещении.
5. Получены результаты исследования по усовершенствованию работы алгоритма распознавания в условиях неоднородного фона и переменного внешнего освещения.

Практическая значимость

1. Предложенный алгоритм цифровой предобработки изображения с построением цветовой маски позволяет распознавать маяки с цветовым кодом при сложном фоне, содержащем сходные по оттенку цвета с маяками.
2. Предложен алгоритм работы телевизионной измерительной системы для задач позиционирования в помещении на основе модели перспективной проекции, позволяющий достигнуть точности позиционирования $2,8 \pm 0,6$ мм. Точность сравнима с получаемой при использовании лазерных и инфракрасных опорных маяков, при

значительной экономии временных и материальных ресурсов на этапе реализации системы.

3. Проведено усовершенствование алгоритма распознавания маяков для минимизации влияния низкой освещенности сцены и цветовой неоднородности фона. Определены параметры фильтрации: для насыщенности системы HSV: кривизна сигмоида $k = 0,3$; смещение пороговой точки сигмоида $\Delta = 30$; для яркости системы HSV: кривизна $k = 0,1$; смещение $\Delta = 50$; для оттенка определена дисперсия: $D = 10$. Определены параметры распознавания маяка: порог разницы в длинах векторов маяка – 10%, максимальный угол между векторами – 7° .

4. Получены результаты по влиянию шума на систему позиционирования. ПОСШ работоспособности – $16,6 \pm 0,1$ дБ.

Разработанные алгоритмы требуют для их практической реализации относительно небольших вычислительных ресурсов, что позволяет использовать их в системах реального времени.

Результаты работы внедрены в разработки ООО «А-ВИЖН», г. Ярославль и ООО «ПАНТЕОН», г. Ярославль. Отдельные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ЯрГУ им. П.Г. Демидова в рамках дисциплин «Цифровые телевизионные системы» и «Цифровая обработка изображений», а также в научно-исследовательские работы при выполнении исследований в рамках гранта РФФИ №15-08-99639-а и в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России на оказание государственных услуг №1060. Результаты внедрения подтверждены соответствующими актами. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Достоверность полученных научных результатов обусловлена применением адекватного математического аппарата, подтверждается их совпадением с результатами работы в реальных условиях и сопоставлением с рядом результатов из литературных источников.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

- 15-я, 16-я и 17-я Международные конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва, 2013–2015.
- 7-й Всероссийский Форум студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах», Санкт-Петербург, 2013.
- 5-я и 6-я Всероссийская научно-техническая конференция «Техническое зрение в системах управления», Москва, 2014, 2015.
- 4-я Всероссийская конференция «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации», Нижний Новгород, 2014.
- 15-я Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы развития и применения средств ПВО на современном этапе. Средства ПВО России и других стран мира, сравнительный анализ», Ярославль, 2014.
- 9th Open German-Russian Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding (OGRW 2014), Koblenz, Germany, 2014.
- 16th Conference of Open Innovation Association FRUCT, Oulu, Finland, 2014.
- 13-я Всероссийская научная конференция «Нейрокомпьютеры и их применение», Москва, 2015.
- 17th Conference of Open Innovation Association FRUCT, Yaroslavl, Russia, 2015.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 научные работ, из них 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, 2 публикации проиндексированы в SCOPUS, 16 докладов на международных и всероссийских научных конференциях и получено одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников, содержащего 91 наименование. Она изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 71 рисунок и 11 таблиц.

Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Алгоритм предобработки телевизионного изображения, построения цветовой маски изображения и распознавания маяков с цветовым кодом.
2. Алгоритм работы телевизионной измерительной системы для позиционирования в помещении на основе модели перспективной проекции.
3. Усовершенствование работы алгоритма распознавания цветowych маяков в условиях неоднородного цветового фона и изменения освещения.

Личный вклад автора. Выносимые на защиту положения предложены и реализованы автором самостоятельно в ходе выполнения научно-исследовательских работ на кафедре динамики электронных систем Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю – д.т.н., профессору Ю.А. Брюханову, а также д.т.н., доценту А.Л. Приорову за помощь на всех этапах выполнения данной работы. Отдельная благодарность преподавателям ЯрГУ им. П.Г. Демидова А.Н. Кренину, А.Б. Герасимову, Л.Н. Казакову, В.А. Тимофееву, К.С. Аремову, Т.К. Артёмовой, работы которых оказали значительное влияние на формирование взглядов автора в данном научном направлении. Эти взгляды формировались также в совместной работе с коллегами по лаборатории «Цифровые цепи и сигналы» кафедры динамики электронных систем ЯрГУ им. П.Г. Демидова, среди которых особенно хочется отметить

Ю. Лукашевича, А. Топникова, И. Лебедева, В. Волохова, А. Трубкина, Г. Тупицина, А. Прозорова, М. Сагацияна.

Отдельная благодарность родным, близким, в особенности моей матери Тюкиной Надежде Павловне за терпение, поддержку и предоставленную возможность заниматься научной деятельностью.

1. АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ НА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

1.1. Вводные замечания

Пример работы обобщенной системы позиционирования приведен на рис. 1.1, где объект позиционирования O определяет свое местоположение на основе заранее заданных координат опорных точек A , B и C . В различных системах используется разные типы опорных точек, разное их количество, которое в результате влияет на точность позиционирования.

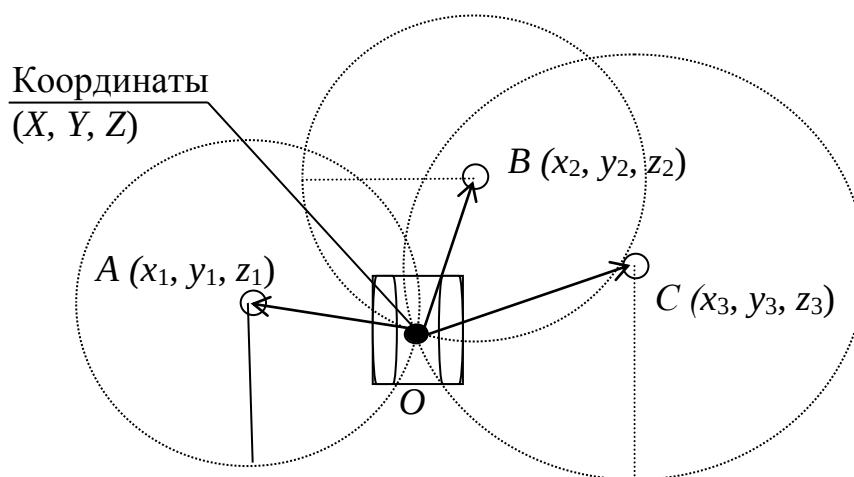


Рис. 1.1. Обобщенная схема позиционирования

Анализ существующих разработок показывает, что сегодня системы, реализующие функции позиционирования в помещениях, находятся на стадии развития. Наиболее популярными на сегодняшний день технологиями позиционирования внутри помещений являются:

- 1) Метод радиотпечатков сигналов точек доступа Wi-Fi. Подобные решения задачи позиционирования в помещении активно развиваются на протяжении последних 15 лет и имеют различные подходы [11, 48, 50, 69, 90]. В основном все они для решения задачи опираются на существующую радиосеть помещения. Основные параметры сигнала, используемые при решении задачи позиционирования – это уровень принимаемого сигнала RSS (Received Signal Strength) и время прохождения сигнала от одного устройства

до другого (ToA – Time of Arrival). Для надежного функционирования таких систем, требуется предварительная разметка помещения (калибровка системы), т.е. анализ индивидуальных радиоотпечатков от опорных Wi-Fi точек. Причем, изменение положение одной из опорных точек доступа требует повторной калибровки системы [34, 48]. Точность подобных систем в лучшем случае достигает 1-3 метров [77, 90].

2) Позиционирование по Bluetooth-маякам [10, 20]. Данный метод схож с технологией позиционирования по Wi-Fi точкам доступа, только в данном случае для создания радиоотпечатков используются специальные Bluetooth-маяки, которые располагаются по периметру помещения. Разработчики подобных систем заявляют точность позиционирования своих систем до 1 метра [9, 20].

3) Инфракрасное позиционирование. При инфракрасном позиционировании ИК-маяки излучают инфракрасные импульсы с определенным периодом. Приемник системы обрабатывает данные импульсы, и местонахождение приемника рассчитывается по времени прохождения сигнала от источника к приемнику. Недостатками такой системы является невысокая относительная точность и низкая помехоустойчивость от солнечного излучения, люминесцентных ламп и в результате переотражений. ИК лазер повышает дальность и точность измерений, но обходится дороже. Точность позиционирования составляет до 10 сантиметров [59, 71].

4) Ультразвуковое позиционирование. Ультразвуковые датчики работают на частотах от 40 до 130 кГц. Расстояние рассчитывается по времени прохождения сигнала от датчика до приемника. Используя несколько приемников, можно точно рассчитать местоположение передатчика. Рекомендуется использовать четыре приемника. Недостатки: потери сигнала из-за препятствий, ложные сигналы из-за отражений и помехи от высокочастотных источников звука (например, от ультразвуковых дефектоскопов, ультразвуковых ванн на производстве, УЗИ в больнице). Для

исключения этих недостатков требуется тщательное планирование системы. Достоинство – высочайшая, до трех сантиметров, точность позиционирования.

5) Решения на основе радиочастотных меток (так называемых RFID-меток). Система состоит из пассивных RFID-меток и считывателя, который читает идентификатор метки и отображает её положение на схеме. Основные такой технологии в том, что RFID-метки не требуют контакта или прямой видимости при взаимодействии объекта и сканера, имеют высокую скорость считывания, несут большое количество перезаписываемой информации и достаточно хорошо защищены от подделок. Однако изготовление большого количества радиочастотных меток существенно отражается на стоимости системы, а сами метки подвержены влиянию электромагнитных помех [90].

Системы на основе GSM и с использованием геомагнитных данных не перечислены в связи с их низкой способностью к точному позиционированию в помещении [33].

Подходы 1) и 2) по решению задачи позиционирования в помещении имеют высокую погрешность определения местоположения объекта вследствие сильной подверженности различным радиопомехам от внешних источников, переотражений радиосигналов и наводок [34, 59, 71, 77]. Технологии, описанные в 3) и 4), имеют высокую точность позиционирования, но сильно подвержены помехам. К тому же, при работе системы в больших закрытых пространствах: складские терминалы, аэропорты, торговые центры и др. – необходимо большое количество маяков, из-за их невысокой дальности действия, что может привести к большим экономическим затратам. Кроме того, такие маяки, как и в технологиях 1) и 2), требуют постоянного электропитания. Данный фактор, в зависимости от времени работы, может быть также экономически невыгодным.

В результате проведенного анализа установлено, что наиболее надежной технологией для работы в помещении является работа с использованием систем прикладного телевидения. Такие системы работают с

видимым диапазоном электромагнитного спектра: он удобен для практического использования в зоне прямой видимости, позволяет четко ориентироваться в пространстве, обладает неплохой помехозащищенностью и в общем случае лишен такого недостатка, как переотражение сигнала [11, 48]. Кроме того, для работы в данном диапазоне можно обойтись простой недорогой телекамерой.

Сегодня системы прикладного телевидения применяются во многих сферах жизни [44]. Рассмотрим некоторые работы в сфере позиционирования и навигации, использующие системы прикладного телевидения:

1. Система сопровождения ориентира мобильным роботом. В данной работе телевизионная система на борту робота анализирует окружающее пространство и при распознавании цветовой меткой следует за ней [17, 18, 60].

2. Система ориентирования по предметам интерьера. В данном методе телевизионная система используется на двух этапах: обучение системы, т.е. изучение помещения – расположение, форма и размер четырехугольных объектов: двери, плакаты, шкафы, окна и др.; и анализ окружающего пространства путем сравнения существующей и изученной моделей [13, 21].

3. Ориентация по QR-кодам. Двумерный штрих код, так называемый QR-код, может заключать в себе информацию до 4000 символов. Это дает большие возможности в задачах позиционирования и навигации [32, 34]. Но QR-код, основанный на распознавании границ между черными и белыми областями двумерного штрих-кода, читается только при неподвижном изображении, иначе «смазывание» изображения приводит к ошибкам чтения, что является серьезным недостатком.

4. Система локализации роботов с цветовыми маяками для управления в киберфутболе. В основе распознавания цветовых маяков лежит метод третьего наблюдателя, с использованием телевизионной камеры, путем

сравнения получаемого изображения «игрового поля с роботами» с «игровым полем без роботов» [45].

5. Ориентация по цветовым меткам, расположенным на однородном по цвету фоне, методами триангуляции. В работе [5] используются однотонные цветовые маяки, распознавание которых происходит за счет выделения их на монотонном сером фоне при обработке телевизионного изображения.

Все описанные системы, использующие прикладные телевизионные системы так или иначе имеют сильную зависимость от внешних условий. В методе 1 решаются задачи сопровождения, т.е. контроль движущейся метки. Система 2 зависит от предметов интерьера, которые могут меняться независимо от самой системы, что нарушит её работу, также как система 4 зависит от игрового поля, а система 5 от монотонного фона.

На основании проведенного анализа установлено, что наиболее надежным каналом во многих случаях, особенно при работе в помещении, является оптический. Несмотря на большое количество наработок в данной теме, автономной системы позиционирования, которая сможет работать в действительной обстановке без подготовленного фона, не было обнаружено.

В связи с этим, в данной диссертационной работе предложена система прикладного телевидения на основе цифровой обработки изображения для решения задач позиционирования в помещении автономной МРП. В такой системе в качестве опорных точек предложено использовать специальные маяки с цветовой кодировкой известного размера с заданными координатами. Цветовая кодировка представляет собой набор областей разного цвета, находящихся в непосредственной близости друг от друга. В отличие от системы [5], такая кодировка является независимой от цветности и текстуры фона. В сравнении с ультразвуковыми, инфракрасными и лазерными маяками, маяки с цветовой кодировкой просты в изготовлении и не требуют источников питания, что позволяет им оставаться работоспособными

неограниченное время, а приемником оптического сигнала от маяков может служить обычная цветная телевизионная камера [53].

1.2. Телевизионные измерительные системы

1.2.1. Особенности телевизионных измерительных систем

Системы, в работе которых задействованы телевизионные камеры для обработки видеосигнала с целью извлечения количественной информации об объектах, находящихся в поле зрения телевизионных датчиков (ТВД), и использования полученной информации для задач наблюдения, контроля и управления называются телевизионными измерительными системами (ТИС) [58]. ТИС предназначены для дистанционного автоматического контроля над состоянием пространства в угле поля зрения ТВД, измерения параметров совокупности объектов, находящихся в контролируемом пространстве, и при необходимости для управления состоянием и взаимодействием этих объектов. Это позволяет отнести к ТИС широкий класс приборов и устройств, используемых в прикладном и промышленном телевидении для сбора и обработки разнообразной информации, а также для контроля и управления технологическими процессами в составе робототехнических комплексов [37, 43, 52, 75].

На рис. 1.2 приведены структурные схемы ТИС двух типов, отличающихся технологической сложностью выполнения задач измерения и контроля параметров объектов или процессов.

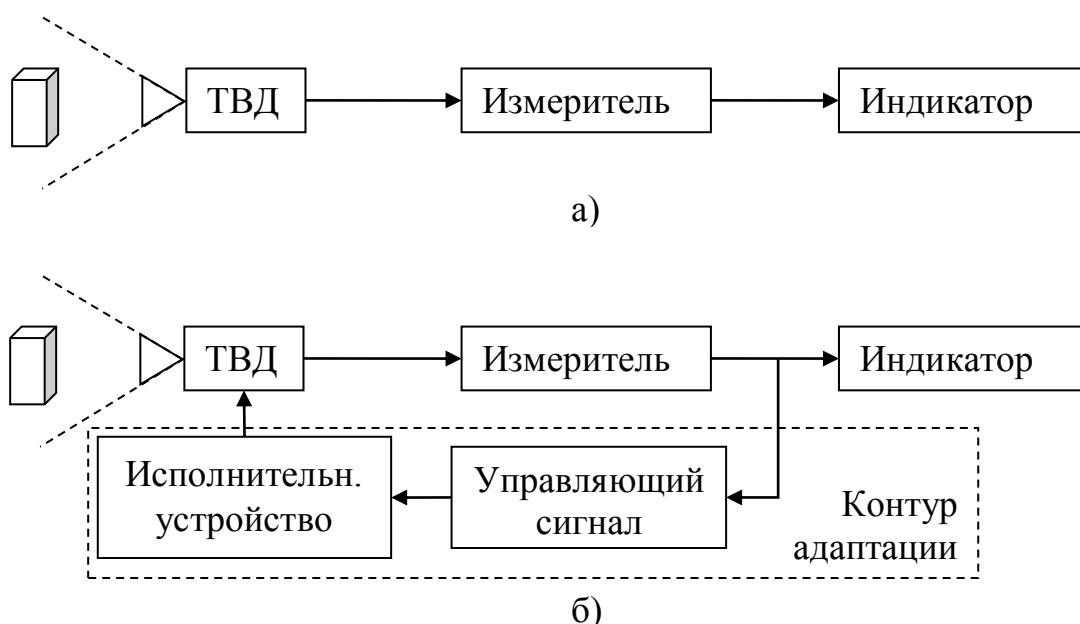


Рис. 1.2. Структурная схема ТИС: а) регистрирующего типа; б) с адаптацией

ТИС регистрирующего типа (рис. 1.2, а) содержит ТВД, измеритель параметров объекта, расположенного в поле зрения объектива, и устройство индикации и регистрации результатов измерения. Для успешной работы такой ТИС достаточно расположить измеряемый объект в поле зрения ТВД и создать подходящие для измерения условия. В общем случае, кроме задач измерения, алгоритм работы измерительного блока выполняет автоматический поиск и обнаружение объекта.

Для более сложных условий работы, когда внешние условия могут меняться, такие как: освещенность объекта, его расположение и другие параметры, применяют ТИС с адаптацией (рис. 1.2, б). В системах такого типа по сравнению с предыдущей структурой введен дополнительный контур адаптации, который включает формирователь управляющих сигналов и исполнительное устройство, изменяющее параметры ТВД (поворот оптической оси, измерение угла зрения, диафрагмы объектива и т.д.) таким образом, чтобы оптимизировать условия измерения контролируемого параметра объекта.

Важно понимать, что измерительные ТВ-системы и вещательные имеют принципиальные различия. Признаком, согласно которому оба типа систем следует отнести к телевизионным, является наличие ТВД, что связано

с одинаковым способом преобразования оптического изображения наблюдаемого объекта в видеосигнал. Основное же отличие между системами состоит в назначении и дальнейшем использовании видеосигнала. В вещательных системах обязательной заключительной операцией является преобразование видеосигнала в изображение, при этом качество работы системы оценивается степенью соответствия ТВ-изображения на экране ВКУ его оптическому оригиналу.

Принципиально важной отличительной особенностью ТИС является наличие измерительного блока, предназначенного для обработки видеосигнала с целью извлечения из него информации о наблюдаемом объекте и измерения контролируемых параметров этого объекта. Другой отличительной особенностью ТИС является способ представления информации на выходе системы. В отличие от вещательных систем, в которых информация представляется в виде ТВ-изображения на экране видеоконтрольного устройства и предназначена для визуального восприятия, в ТИС выходная информация в виде цифровых и аналоговых сигналов поступает на устройство регистрации и индикации или же используется в канале управления. Характерной особенностью этих сигналов является связь между параметром информационного сигнала и измеряемым параметром объекта. Поэтому возможно построение объективного количественного критерия качества работы ТИС, основанного на исследовании точностных характеристик результатов измерений. Создание аналогичного критерия для вещательных ТВ-систем затруднено, как уже отмечалось из-за отсутствия обобщенного количественного критерия оценки качества изображения [58].

Таблица 1.1. Признаки вещательной и измерительной ТВ-систем

Признак ТВ системы	ТСВН	ТИС
Наличие ТВД	Обязательно	Обязательно
Наличие видеоконтрольного устройства	Обязательно	Необязательно

Наличие измерительного блока	Необязательно	Обязательно
Высокое качество изображения	Обязательно	Необязательно
Высокая точность измерения	Необязательно	Обязательно
Субъективный критерий качества	Да	Нет
Объективный критерий качества	Нет	Да

1.2.2. Информативность оптического изображения

Измерительные возможности телевизионных систем определяются количеством неискаженной информации об объекте. Процесс формирования видеосигнала состоит из двух этапов. На первом строится оптическое изображение объекта в плоскости фотоэлектрического преобразователя (ФЭП), на втором с помощью ТВ-развертки оно преобразуется в видеосигнал. Оптическая система (объектив) ТВД предназначена для создания оптического изображения на входе ФЭП. Это изображение, если пренебречь искажениями, вносимыми объективом и средой распространения света, можно рассматривать как центральную проекцию объекта на плоскость.

Свойства центральной проекции позволяют рассматривать изображение объекта как его масштабированную копию, в которой сохраняется информация об объекте, и, следовательно, его параметры могут быть вычислены путем соответствующего пересчета измеренных параметров оптического изображения. Среди параметров объекта, которые могут быть определены по его оптическому изображению, выделим три группы: геометрические, энергетические, цветовые (табл. 1.2) [61].

Таблица 1.2. Измеряемые параметры объекта

Геометрические	Энергетические	Цветовые
Линейный размер, l	Световой поток, Φ	Система XYZ: – координаты цвета, x', y', z' – координаты цвета, x, y, z
Угловая скорость, ω	Освещенность, E	
Площадь, S	Яркость, L	
Координаты:	Сила света, I	Система RGB:

– по горизонтали, X – по вертикали, Y		– координаты цвета, r', g', b' – координаты цвета, r, g, b
Угловые координаты – по горизонтали, α – по вертикали, β		

В первом приближении связь между геометрическими параметрами объекта и его оптическим изображением может быть установлена на основании законов геометрической оптики. На рис. 1.3 показано, как формируется изображение удаленного объекта объективом с фокусным расстоянием f . При $Y \gg f$ (Y – расстояние до объекта) сфокусированное изображение объекта формируется в фокальной плоскости объектива, при этом линейный масштаб изображения $M = f' / Y$.

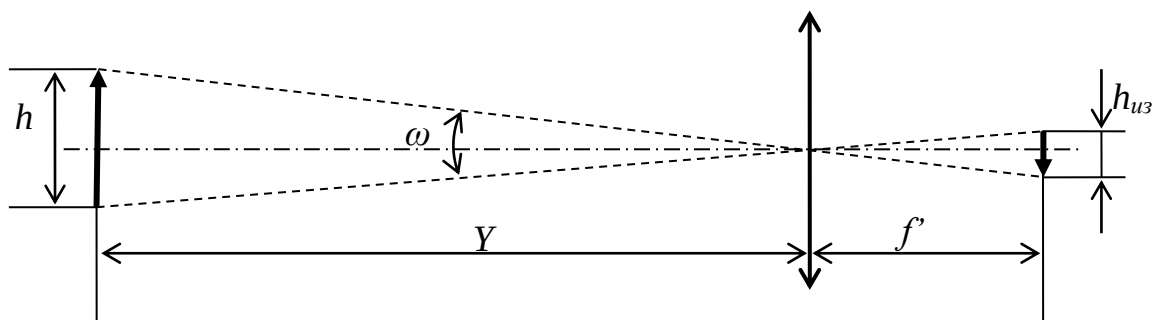


Рис. 1.3. Формирование оптического изображения объекта

Соотношения для определения геометрических параметров объекта приведены в табл. 1.3. Координаты X, Z отсчитываются относительно осей x, y , пересекающихся на оптической оси объектива; угловые координаты α, β отсчитываются относительно оптической оси объектива. Для вычисления некоторых геометрических параметров объекта необходимо знать масштаб изображения M , что возможно при известной дальности объекта Y .

Таблица 1.3. Определение геометрических параметров объекта

Геометрический параметр	Соотношение
Линейный размер	$h = h_{из} / M$
Угловой размер	$\omega = 2 \arctg (h_{из} / (2f'))$;

	$\omega \approx h_{из} / (2f'), \text{ при } f' \gg h_{из}$
Площадь	$S = S_{из} / M^2$
Координаты: – по горизонтали – по вертикали	$X = X_{из} / M = Y \operatorname{tg} \alpha$ $Z = Y_{из} / M = Y \operatorname{tg} \beta$
Угловые координаты: – по горизонтали – по вертикали	$\alpha = \operatorname{arctg}(X_{из} / f');$ $\alpha \approx X_{из} / f' \text{ при } f' \gg X_{из};$ $\beta = \operatorname{arctg}(Y_{из} / f');$ $\beta \approx Y_{из} / f' \text{ при } f' \gg Y_{из};$

Здесь следует заметить, что приведенные в табл. 1.3 соотношения, строго говоря, справедливы для случаев наблюдения объектов заметной формы и размеров. При решении задач измерения координат точечных объектов помимо законов геометрической оптики необходимо учитывать также влияние aberrаций оптической системы, предопределяющих вид весовой функции объектива, а, следовательно, и форму изображения наблюдаемого объекта [61].

1.3. Цифровая обработка телевизионных изображений

Прикладные телевизионные системы (ПТС) выдвигают самые высокие требования ко многим направлениям научно-технической мысли. Составными частями ПТС являются:

- оптическая система;
- преобразователь свет-сигнал;
- электронный тракт ввода элементов изображения в память ЭВМ или специального вычислителя;
- математическое обеспечение сбора и обработки необходимых ТВ-данных.

На выходе ПТС формируется видеосигнал, цифровая обработка которого получила название машинного (технического) зрения [84].

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в области машинного зрения, эффективное его использование в качестве средства автоматизации приходится, прежде всего, на наиболее развитые производства с общей высокой культурой и технологией. В плохо организованных средах и исследовательских задачах на систему технического зрения возлагается роль дополнения, расширяющего возможности и повышающего эффективность человеческого зрительного анализа, при ведущей и определяющей роли человека-оператора или исследователя [4]. Следует констатировать тот факт, что не существует универсального математического аппарата, который позволил бы сформировать общий формализованный подход к построению систем технического зрения. Это связано с тем, что реальный мир демонстрирует чрезвычайную изменчивость входных изображений, и вид объекта на изображении может значительно меняться при изменениях освещенности или в присутствии других объектов, которые система может даже не ожидать.

Поэтому необходимо разрабатывать все более совершенные компьютерные алгоритмы для вычисления «сущности», или, инвариантных признаков объектов. К тому же, для ускорения операций обработки изображений, которые на процессоре общего назначения могут требовать большого количества времени, доступно специальное аппаратное обеспечение [2]. Многие первые параллельные компьютеры стоимостью в миллионы долларов были разработаны в расчете на задачи обработки изображений, однако сегодня большинство основных операций могут быть выполнены с помощью набора плат ценой несколько сотен долларов. Обычно специальная аппаратура нужна только для высокоскоростной обработки изображений и в системах реального времени.

Были разработаны специальные языки программирования, в которых операции по обработке изображений были оформлены в виде элементов языка. Иногда эти языки содержали также операции для управления промышленными роботами. Сегодня стало очевидно, что хорошие системы

обработки изображений можно и нужно писать на языке программирования общего назначения, например, на Си, а компьютер общего назначения можно купить во многих обычных магазинах.

Машинное зрение связано со многими другими дисциплинами, и важно отличать обработку и распознавание изображений. В обработке изображений главное внимание уделяется преобразованию одних изображений в другие, в то время как распознавание изображений сосредоточено на формировании выводов на основе изображений и явном получении необходимых для этого описаний сцен [76]. Обработка изображений часто используется совместно с распознаванием.

1.3.1. Системы координат

Системы координат необходимы и для качественного, и для количественного анализа трехмерных сцен. В общем случае в задачах анализа трехмерных сцен используются пять различных систем координат. Примерами решаемых задач являются управление роботизированным производственным модулем, снабженным телевизионной зрительной системой, или формирование виртуальной трехмерной среды [3].

Пять различных систем координат приведены на рис. 1.4. В четырех из этих систем координаты являются действительными числами, задающими положение относительно непрерывных осей. В системе координат изображения координаты принимают целые значения, служащие индексами в массиве пикселей изображения [14].

1. *Пиксельная система координат I.* В пиксельном массиве каждая точка имеет целочисленные пиксельные координаты. Многие характеристики сцены можно определить непосредственным анализом изображения в терминах строк и столбцов пикселей.

2. *Система координат объекта O.* Система координат объекта используется в техническом зрении для описания моделей идеальных объектов.

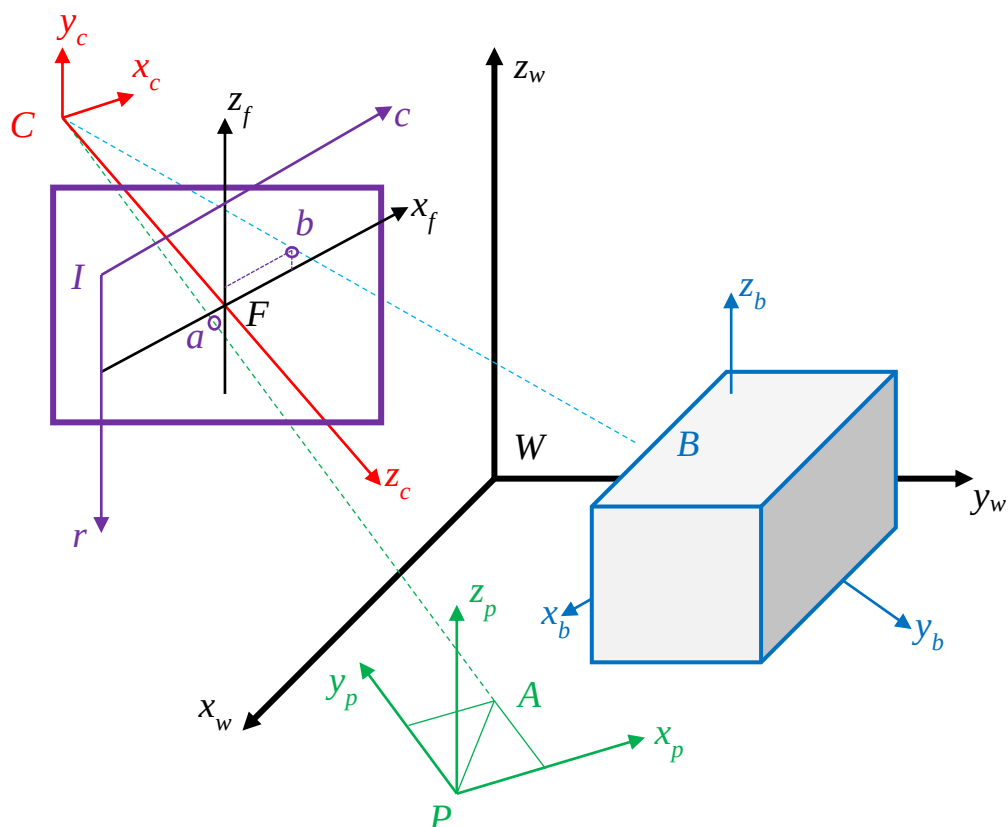


Рис. 1.4. Пять систем координат, которые используются при анализе трехмерных сцен

3. *Система координат камеры C.* Зачастую применяется для описания камероцентрического вида. Например, чтобы определить, будет ли объект располагаться прямо напротив датчика, двигаться вдаль, и т. п.

4. *Действительная система координат изображения F.* В системе координат камеры значения координат являются действительными числами и обычно измеряются в тех же единицах, что и мировые координаты – например, в мм (в т. ч. дальностная координата или глубина).

5. *Мировая система координат W.* Используется для описания взаимного расположения объектов в пространстве. В автоматизированном производственном модуле или среде виртуальной реальности передача координатных данных между двигателями и датчиками часто выполняется в мировых координатах. Например, датчик изображений сообщает машине расположение объекта и сообщает точку в мировых координатах, куда этот объект должен быть перемещен [87].

1.3.2. Задача распознавания образов

Процесс сопоставления экземпляра объекта с одним прототипом (моделью) объекта или с описанием класса называется верификацией. Система распознавания должна обладать памятью для запоминания объектов, которые она будет распознавать. Представление объектов в памяти может быть встроенным, например, модель прыгающей лягушки; или может быть сформировано по большому количеству эталонных образцов, что напоминает изучение алфавита в начальной школе; или это представление может быть запрограммировано в терминах специфических признаков изображения, что напоминает, например, обучение ребенка отличать пожарные машины от автобусов [16]. Вопросы распознавания и обучения образам являются глубокими темами, представляющими интерес для распознавания образов и технического зрения.

Идеальный класс – это множество объектов, у которых есть некоторые важные общие – свойства [12]. На практике, это класс, принадлежность объектов к которому обозначается с помощью какой-либо метки класса. Классификация – это процесс назначения меток объектам согласно некоторому описанию свойств объектов. Классификатор – это устройство или алгоритм, получающий в качестве входных данных описание объекта и выдающий в качестве результата метку класса.

Класс выбросов – это общий класс всех объектов, которые не удалось отнести ни к одному из известных системе классов.

Экстрактор характерных признаков среди исходных данных, полученных от датчика, обнаруживает информацию, полезную для классификации. Экстрактор признаков обычно реализуется программно. Программное обеспечение относительно легко адаптировать к аппаратному обеспечению датчика. Программная реализация в процессе исследований и разработки упрощает достижение выходных данных, наиболее удобных для классификации.

Классификатор использует признаки, найденные среди исходных данных датчика, для присвоения объекту метки одного из m известных классов $C_1, C_2, \dots, C_{m-1}, C_m = C_2$, где C_2 обозначает класс выбросов.

На рис. 1.5 показана блок-схема системы классификации. Входными данными, представляющими объект для классификации, служит d -мерный вектор признаков x . В системе для каждого возможного класса имеется по одному блоку, в котором хранятся некоторые сведения K об этом классе и некоторые характеристики обработки. Результаты m вычислительных операций передаются на окончательный этап классификации, на котором принимается решение о классе объекта.

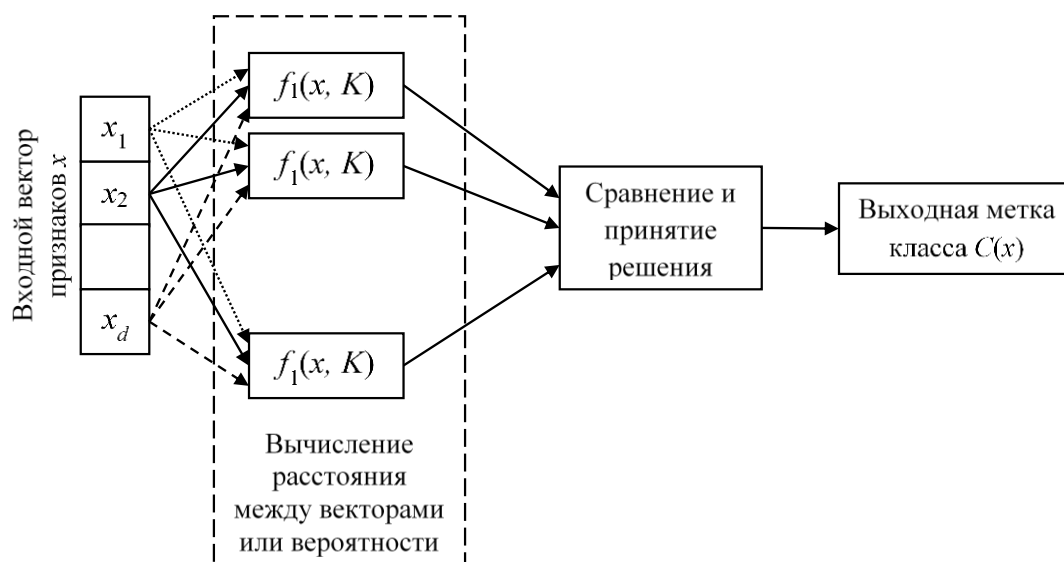


Рис. 1.5. Схема системы классификации: классифицирующие функции $f(x, K)$ выполняют вычислительные операции над входным вектором признаков x с использованием некоторых сведений K , полученных на этапе обучения

Коэффициент ошибок системы классификации – это одна из численных мер, позволяющих охарактеризовать, насколько хорошо система решает свою задачу [29]. Другими характеристиками являются скорость (количество объектов, обрабатываемых за единичный промежуток времени) и стоимость (учитывающая цену аппаратного, программного обеспечения и процесса разработки). Производительность системы зависит и от количества ошибок, и от количества выбросов. Классификация всех входных данных в класс

выбросов означает, что система не делает ошибок, но она бесполезна. Введем несколько определений:

- *ошибка классификации* происходит каждый раз, когда классификатор относит входной объект к классу C_i , хотя верным классом должен быть класс C_j , при этом i не равно j и C_i не равно C_r (C_r – класс выбросов);
- *эмпирический коэффициент ошибок* системы классификации равен количеству ошибок, сделанных на независимых тестовых данных, деленному на количество предпринятых попыток классификации;
- *эмпирический коэффициент выбросов* системы классификации равен количеству выбросов, сделанных на независимых тестовых данных, деленному на количество предпринятых попыток классификации;
- *независимые тестовые данные* – это эталонные объекты известных классов, включая объекты из класса выбросов, которые не использовались при разработке алгоритмов выделения признаков и классификации.

Приведенные выше определения можно использовать на практике для тестирования производительности системы классификации. Следует очень внимательно следить за тем, чтобы эталонные образцы, применяемые на этапе проектирования, и образцы для тестирования были представительными образцами объектов, которые система будет обрабатывать в будущем. Кроме того, образцы для тестирования системы должны быть независимы от образцов, используемых для ее проектирования. Иногда предполагается, что исходные данные подчиняются некоторому теоретическому распределению. С учетом этого можно быстрее вычислить теоретическую вероятность ошибки для оценки производительности системы, а не определять эмпирический коэффициент ошибок по результатам тестирования [23].

Особой разновидностью ошибок являются проблемы двух классов, возникающие, когда два класса имеют противоположные смысловые значения:

- а) правильный прием сигнала и прием с ошибкой;

- б) объект присутствует на изображении и объект отсутствует;
- в) у человека обнаружено заболевание и не обнаружено.

В таких случаях ошибки имеют особое значение и несимметричны.

Рассмотрим сначала жизненную ситуацию в), она является наиболее иллюстративной. Если система ошибочно говорит, что у человека есть заболевание, то ошибка называется ложным срабатыванием или позитивной ошибкой. Если же система ошибочно говорит, что у человека нет заболевания, то ошибка называется ложным пропуском или негативной ошибкой. В случае ложного срабатывания, вероятно, что человек подвергнется дополнительным анализам или перенесет ненужные медицинские процедуры. В случае ложного пропуска диагноз будет потерян и человек не будет вылечен, что может привести к самым неприятным последствиям. Цена этих ошибок существенно отличается. Поэтому может иметь смысл предусмотреть принятие решений с тенденцией минимизации ложных пропусков даже за счет роста числа ложных срабатываний [70].

В случае а), например, при работе линии передач бинарных данных. Ложный пропуск (ошибка 1-го рода) означает, что система принимает сигнал со значением 0, когда передавался 1. Или, наоборот, была принят 1, при передаче 0 – это относится к позитивной ошибке (ошибке 2-го рода).

Ложные срабатывания в примере б) могут означать распознавание опорных точек в системе позиционирования, когда фактически данная опорная точка отсутствует на изображении, а система решила

её распознать. Это приводит к ошибке определения местоположения объекта

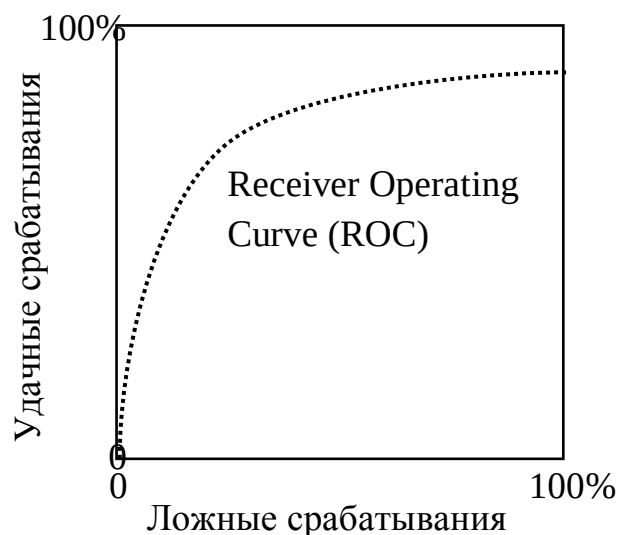


Рис. 1.6. Кривая функционирования приемника

ориентации. Ложные пропуски в случае б) также могут иметь негативные последствия.

На рис. 1.6 показана типичная кривая функционирования приемника, которая представляет взаимосвязь числа ложных срабатываний и числа правильных обнаружений. Для увеличения количества корректно распознаваемых объектов обычно приходится идти на увеличение количества пропущенных объектов, которые будут отнесены к выбросам.

Кривая функционирования приемника (receiver operating curve, ROC) показывает отношение количества корректных и неправильных попыток распознавания. Обычно количество ложных срабатываний возрастает при попытке системы обнаружить большее количество известных объектов. Уменьшение производительности системы часто может быть достигнуто при малых ложных срабатываниях, но корректное обнаружение почти всех объектов приводит к тому, что значительная часть неизвестных объектов будет неправильно отнесена к каким-либо известным классам.

В задаче поиска документов (document retrieval, DR) или изображений требуется на основе признаков, содержащихся в пользовательском запросе, найти объекты интереса класса C_1 , возможно, вместе с не слишком большим количеством не интересующих объектов класса C_2 [36]. Например, пользователь может заказать поиск изображений солнечных закатов или лошадей. Производительность системы, обслуживающей такие запросы, характеризуется точностью и полнотой выборки.

Точность DR-системы равна количеству найденных релевантных документов (истинные элементы класса C_1), деленных на общее число найденных документов (истинные элементы класса C_1 плюс ложные срабатывания, в действительности, принадлежащие C_2).

Полнота выборки DR-системы равна количеству релевантных документов, найденных системой, деленному на общее количество релевантных документов в базе данных.

Например, предположим, что необходимо оценить численность аудитории на изображении [88]. Допустим, система обнаруживает 135 из 150 фигур людей и происходит 45 ложных срабатываний. Уровень распознавания этой операции поиска (классификации) составляет $135/180 = 75\%$, а полнота выборки $135/150 = 90\%$. Система может достичь 100% полноты выборки, если распознает все фигуры людей на изображении, но при этом её уровень распознавания будет чрезвычайно низким. С другой стороны, если классификация тщательно настроена на низкий коэффициент ложных срабатываний, то уровень распознавания будет высоким, но полнота выборки может быть низкой.

1.3.3. Фильтрация телевизионных изображений

Фильтрация относится к области обработки изображений, так как данные методы в качестве исходных данных получают входное изображение и в результате формируют другое, выходное изображение. В качестве синонимов термина «обработка изображений» также часто используются термины фильтрация изображений, улучшение, повышение качества и предварительная обработка изображений. Основная идея состоит в том, что считается, что наряду с некоторым сигналом или структурой, которую необходимо извлечь, изображение содержит неважные или нежелательные данные, которые требуется подавить. Решения относительно изображения принимаются на уровне отдельного пикселя (элемента изображения) и его локальной окрестности [7].

Большинство методов фильтрации основаны на том предположении, что значение каждого пикселя выходного изображения можно вычислить по локальной окрестности соответствующего пикселя входного изображения. Однако ряд методов повышения качества изображений являются глобальными в том смысле, что при создании выходного изображения некоторым образом используются все пиксели входного изображения. Среди рассматриваемых тем наиболее важными являются две:

- сопоставление окрестности изображения с шаблоном или маской (корреляция);
- свертка, представляющая собой метод, позволяющий единообразно выполнять много различных операций фильтрации.

Операторы улучшения изображения предназначены для повышения вероятности обнаружения человеком или машиной важных деталей или объектов на изображении. Примерами таких операторов являются операторы подавления шума, сглаживания, повышения контраста и усиления краев.

Вместо присвоения всем пикселям фильтра равных весов (как при усредняющем фильтре) предпочтительнее выбрать веса такими, чтобы они уменьшались с увеличением расстояния входных пикселей от центрального пикселя $I[x_c, y_c]$. Подобные весовые коэффициенты имеет фильтр Гаусса, который, возможно, является наиболее широко используемым фильтром [8].

При применении фильтра Гаусса значение пикселя $[x, y]$ взвешивается с использованием весовой функции

$$g(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}, \quad (1.1)$$

где $d = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}$ представляет расстояние пикселя $[x, y]$ от центрального пикселя окрестности $[x_c, y_c]$ на выходном изображении, для формирования которого применяется фильтр.

1.3.4. Цветовая система HSV

В системе HSV (Hue-Saturation-Value, оттенок-насыщенность-яркость) цветной пиксель кодируется одним значением общей яркости света V и двумя значениями цветности – оттенком H и насыщенностью S [42].

При представлении цветового пространства RGB (Red-Green-Blue, красный-зеленый-синий) в виде куба (рис. 1.7) каждое значение r , g и b может меняться независимо в диапазоне от 0,0 до 1,0.

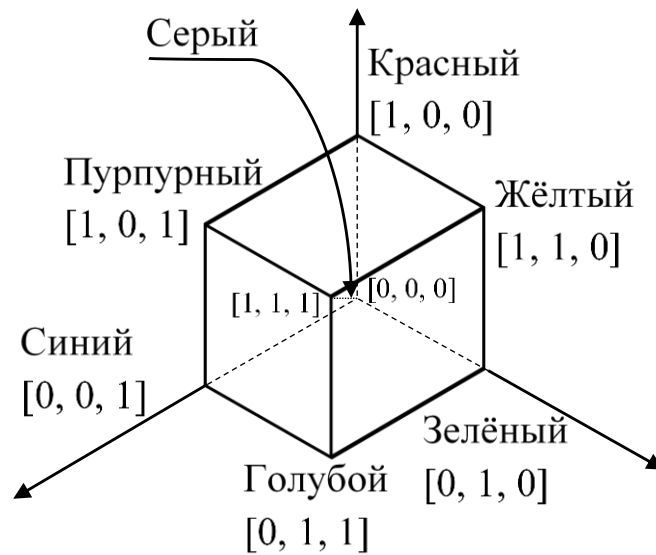


Рис. 1.7. Цветовой куб в нормированных координатах RGB

Плоская проекция цветового куба в направлении главной диагонали имеет вид шестиугольника (рис. 1.8, а). В этом представлении все оттенки серого, ранее располагавшиеся вдоль диагонали цветового куба [78]. С таким способом представления цветового пространства связана еще одна трехмерная модель в виде шестигранного конуса (рис. 1.8, б).

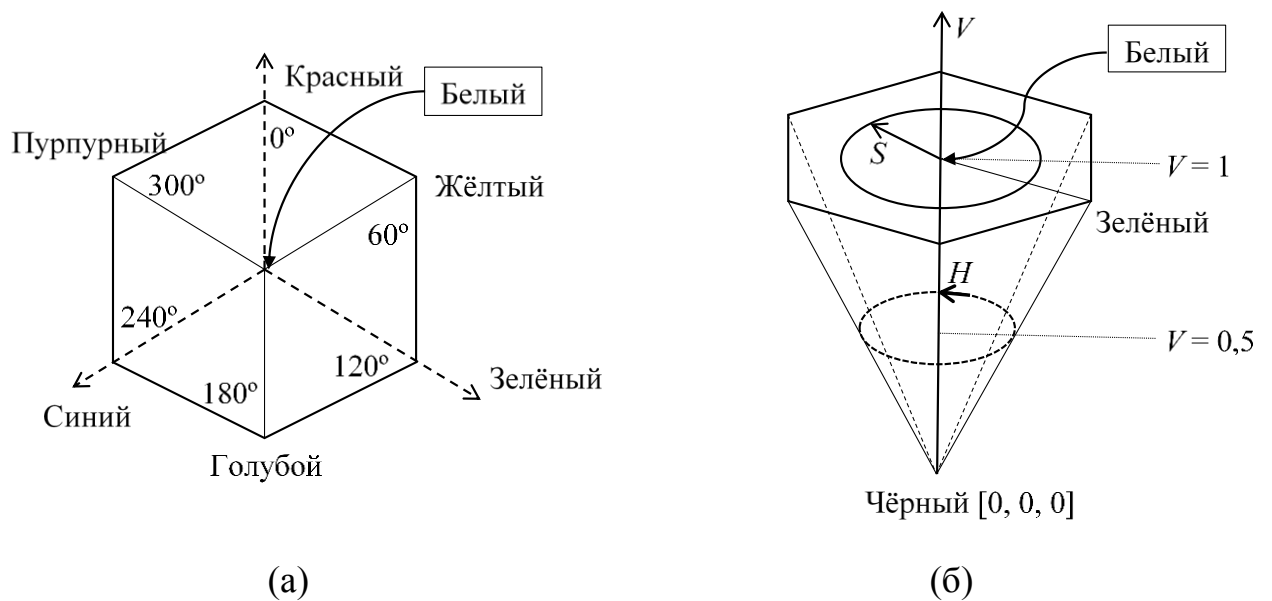


Рис. 1.8. Представление цветового пространства системы HSI в виде шестигранного конуса

В этой модели диагональ куба изображается в виде вертикальной оси яркости V . Оттенок H определяется как угол от 0 до 2π относительно оси красного цвета. Чистому красному цвету соответствует угол 0, чистому зеленому – $2\pi/3$, а чистому синему – $4\pi/3$. Для задания точки в цветовом пространстве необходима третья координата – насыщенность S . Насыщенность характеризует чистоту цвета (цветового тона). Значение 1 соответствует идеально чистому (насыщенному) цвету, а 0 – совершенно ненасыщенному цвету, т. е. некоторому оттенку серого цвета.

Существуют различные формы преобразований из цветового пространства RGB в цветовое пространство HSV. Один из наиболее используемых способов перехода выглядит так:

$$\begin{cases} H = \arccos \frac{2R - G - B}{\sqrt{6[(R - 1/3)^2 + (G - 1/3)^2 + (B - 1/3)^2]}}, \\ S = 1 - 3 \min(R, G, B), \\ V = R + G + B. \end{cases} \quad (1.2)$$

Система HSV иногда называется системой HSI, когда вместо яркости используется термин интенсивность (Intensity). Система HSV удобна многим графическим дизайнерам, так как в ней обеспечивается непосредственный контроль яркости и оттенка. Пастельные цвета располагаются в центре цветового пространства вблизи оси V , а глубокие цвета – в периферийных областях шестигранного конуса. HSV лучше остальных цветовых систем подходит для некоторых алгоритмов компьютерного зрения, так как допускает простую нормировку на яркость света и позволяет сосредоточиться на двух параметрах цветности, которые больше связаны со свойствами поверхности, а не источника света [41].

Цветовой оттенок является надежным признаком для цветовой сегментации. Цветовой оттенок не зависит от изменения интенсивности белого света, что обычно происходит в сценах, наблюдаемых системами машинного зрения.

Проблемы интерпретации также возникают в некоторых областях цветового пространства. При близких к нулю значениях насыщенности вычисление и интерпретация цветового тона выполняются ненадежно. При малых значениях интенсивности также ненадежной оказывается интерпретация насыщенности.

1.3.5. Искажения при увеличении расстояния

Интенсивность падающего на поверхность света уменьшается при увеличении расстояния между источником света и поверхностью. Очевидно, что Земля получает меньше солнечной световой энергии, чем Меркурий [79]. На рис. 1.9 показана иллюстрирующая данный факт модель.

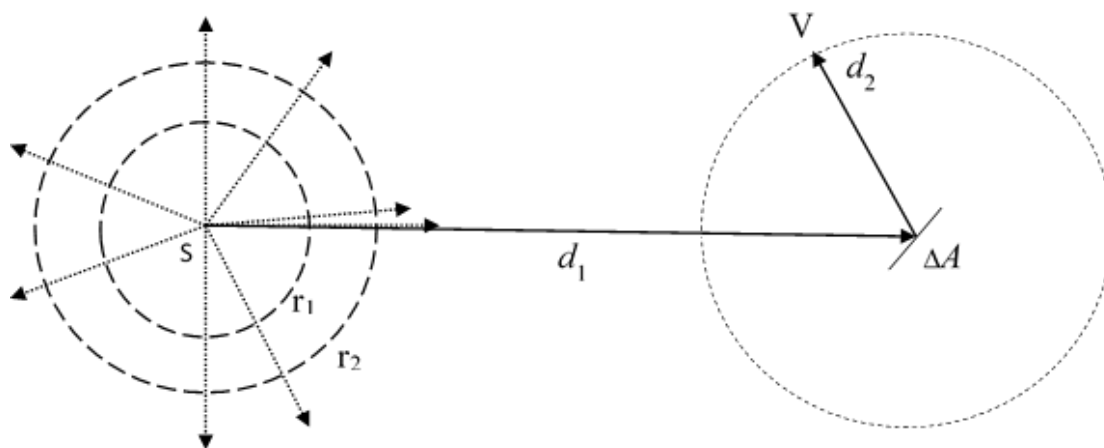


Рис. 1.9. Интенсивность излучаемого и отраженного света

Будем полагать, что источник излучает постоянный световой поток, т.е. одинаковое количество энергии в единицу времени. Площадь сферической поверхности растет пропорционально квадрату радиуса. Тогда количество энергии, приходящейся на единичную площадку сферической поверхности, уменьшается пропорционально квадрату радиуса. Следовательно, интенсивность света, падающего на поверхность объекта, будет уменьшаться пропорционально квадрату расстояния от источника света. На рис. 1.9 это расстояние обозначено d_1 . Эта модель также применима к свету, отраженному от элементов поверхности объекта. Следовательно,

наблюдатель в точке V будет видеть поверхность яркости d_2 , которая обратно пропорциональна квадрату расстояния от поверхности.

Данная модель часто используется в компьютерной графике для вычисления закраски поверхностей, чтобы отображаемые поверхности изображались менее яркими при увеличении глубины их элементов (расстояния от наблюдателя) [39].

При построении модели освещения для большинства поверхностей необходимо учитывать и диффузную, и зеркальную компоненты. Если осветить яблоко карманным фонарем, то мы увидим красный объект с белым бликом. Красный свет отражается диффузно, а блик образуется за счет зеркального отражения. Если при моделировании сцены с яблоком учитывалось бы только зеркальное отражение, то большая часть поверхности яблока была бы не видна.

Часто сцена освещается несколькими источниками света и содержит большое количество поверхностных элементов, отражающих свет от источников. Обмен световой энергией между всеми поверхностными элементами учесть сложно или даже невозможно. Многократно отраженный свет можно смоделировать за счет добавления в модель освещения рассеянного света. В компьютерной графике применение рассеянной компоненты освещения является стандартным приемом, используемым при закраске поверхностей.

Рассеянный свет представляет свет постоянной интенсивности в любой области сцены. Рассеянный свет учитывается при наличии нескольких источников света и многократных переотражений света от различных поверхностей [76].

Некоторые объекты сами излучают свет. Например, это электрическая лампочка или объект, поглощающий электромагнитное излучение невидимого диапазона и излучающий видимый свет. Такие объекты и отражают свет, и излучают. Характеристики излучения и отражения зависят от длины волны. Источники обычно излучают в некотором спектре длин

волн (за исключением монохроматических источников, например, лазеров). Поверхности отражают или поглощают свет также преимущественно на некоторых определенных длинах волн. Возможна разработка датчиков, учитывающих такие особенности. Например, многоспектральные сканеры способны генерировать 200 значений интенсивности при восприятии света, отраженного от одиночного поверхностного элемента. Однако для просмотра человеком результаты восприятия видимого света можно представить с помощью всего трех значений (например, RGB или HSV).

1.4. Методы преобразование координат

1.4.1. Аффинные геометрические преобразования на плоскости

Большое семейство практически полезных пространственных преобразований можно представить в виде произведения матрицы и точки в однородных координатах [15].

1. *Масштабирование.* Одним из наиболее часто применяемых преобразований является масштабирование. Однородное масштабирование одинаковым образом изменяет значения всех координат, т. е. одинаково изменяются размеры всех объектов.

Масштабирование является линейным преобразованием. Поэтому его можно представить в виде суммы слагаемых, описывающих применение масштабного коэффициента к двум базисным векторам двумерного евклидова пространства. Например, $[1, 2] = 1[1, 0] + 2[0, 1]$ и $2[1, 2] = 2(1[1, 0] + 2[0, 1]) = 2[1, 0] + 4[0, 1] = [2, 4]$.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cx \\ cy \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x & 0 \\ 0 & c_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x x \\ c_y y \end{bmatrix}. \quad (1.4)$$

Переход от координат в действительной системе координат изображения, измеряемых в миллиметрах, к координатам в растровой системе координат, измеряемым в пикселях, выполняется с помощью масштабирования. При использовании камер с квадратными пикселями масштабные коэффициенты имеют одинаковые значения $c_x = c_y = c$. Для камер телевизионного стандарта отношение масштабных коэффициентов должно быть равно 4/3.

Поворот точки P на угол θ

Поворот базисных векторов на угол θ

(а) (б)

40

$$R_{\theta}([x, y]) = R_{\theta}(x[1,0] + y[0,1]) = xR_{\theta}([1,0]) + yR_{\theta}([0,1]) = x[\cos \theta, \sin \theta] + y[-\sin \theta, \cos \theta] = [x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \cos \theta], \quad (1.5)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cos \theta - y \sin \theta \\ x \sin \theta + y \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (1.6)$$

Преобразование поворота двумерной точки относительно начала координат записано в виде уравнения (1.6). Как и для любого линейного преобразования, столбцы матрицы поворота можно определить посредством применения этого преобразования к базисным векторам (рис. 1.10, б). Преобразование любого другого вектора можно представить в виде линейной комбинации базисных векторов.

Преобразование поворота сохраняет длину и ортогональность базисных векторов. Это можно проверить геометрически или алгебраически. В качестве непосредственного результата получается, что расстояние между двумя преобразованными точками равно расстоянию между исходными точками. Это свойство жесткого преобразования. Жесткое преобразование можно представить в виде композиции преобразований поворота и переноса. Жесткие преобразования часто используются в операциях с твердыми телами и для перехода между системами координат. Однородное масштабирование с коэффициентом, отличным от единицы, не сохраняет длину, но сохраняет угол между векторами. Свойства преобразований важны для выбора свойств объектов, не зависящих от расположения камеры или объектов в пределах сцены.

3. *Перенос.* Часто требуется выполнить сдвиг точек на заданное расстояние. Это преобразование эквивалентно замене начала координат. Например, преобразование переноса может потребоваться для преобразования координат (строка, столбец) пикселя изображения в координаты (широта, долгота) на карте. Перенос не отображает начало координат $[0, 0]$ на себя, поэтому его не удастся представить с помощью матрицы 2×2 , как это делалось для масштабирования и поворота. Другими

словами, перенос не является линейным преобразованием. Для матричного представления переноса и некоторых других операций можно перейти к матрицам размерности 3×3 . Соответственно, к двумерным координатам точки потребуется добавить еще одну координату. Для этого перейдем к однородным координатам. Добавляемая координата обычно выбирается равной единице, но иногда используются и другие значения.

$$P = [x, y] \cong [wx, wy, w] = [x, y, 1]. \quad (1.7)$$

Преобразование переноса можно представить в виде произведения матрицы переноса и вектора-столбца с однородными координатами точки. В результате преобразования точки $[x, y]$ с использованием матрицы переноса D получается точка $[x', y'] = D([x, y]) = [x + x_0, y + y_0]$,

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + x_0 \\ y + y_0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1.8)$$

4. Поворот, масштабирование и перенос. Типичный пример использования этих преобразований показан на рис. 1.11. Изображение $I[r, c]$ получено с помощью камеры с квадратными пикселями. Оптическая ось камеры направлена перпендикулярно плоскости рабочего пространства $W[x, y]$. Требуется получить формулу преобразования пиксельных координат $[r, c]$ в координаты $[x, y]$, измеряемые, например, в миллиметрах. Это преобразование может быть выражено с помощью комбинации матриц поворота R , масштабирования S и переноса D . Искомое преобразование в матричной форме представлено в уравнении (1.9). Формула преобразования координат P также может быть записана в виде ${}^w P_j = D_{x_0, y_0} S_s R_\theta {}^i P_j$.

Отображение пиксельных координат на координаты $[x, y]$ на плоскости в рабочем пространстве определяется четырьмя параметрами [27]. Это угол поворота θ , масштабный коэффициент s для перехода от пиксельных единиц измерения к миллиметрам, и два параметра переноса x_0 и y_0 . Значения этих четырех параметров можно вычислить по координатам двух управляющих

точек P_1 и P_2 . Управляющие точки соответствуют некоторым явно заметным и легко обнаружимым характерным признакам в рабочем пространстве.

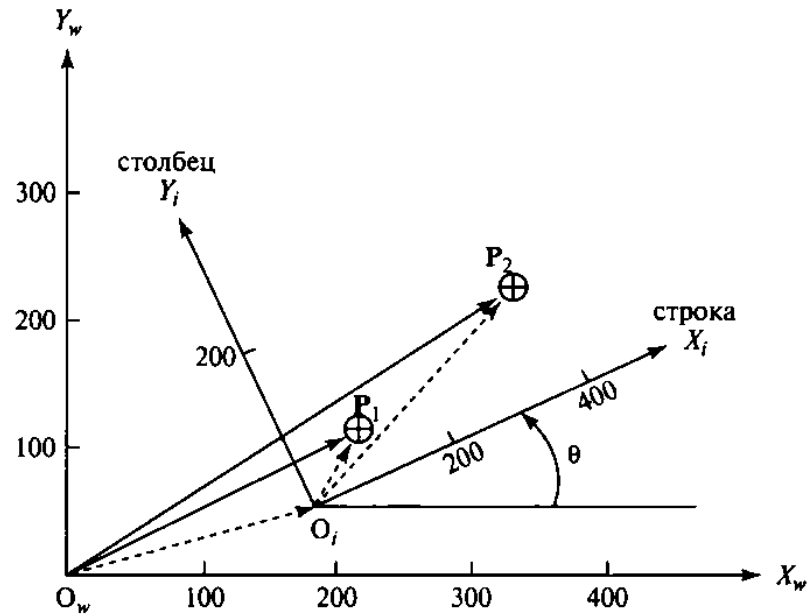


Рис. 1.11. Переход из пиксельной системы координат изображения в мировую систему координат

При обработке фотографий земной поверхности в качестве управляющих точек часто выбираются пересечения дорог, углы зданий, резкие изгибы рек и т. п. Важно отметить, что одна и та же признаковая точка, например, P_1 , может быть представлена двумя (и более) различными векторами. Например, один из них представляет пиксельные координаты точки на изображении I , а второй – координаты $[x, y]$ в мировой системе координат W , измеренные в миллиметрах. Будем обозначать эти представления точки как iP_1 и wP_1 , соответственно.

Если известны координаты точки P_1 в обеих системах координат, то с помощью матричного уравнения (1.9) можно записать два уравнения с четырьмя неизвестными (1.10) и (1.11).

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

$$x_w = x_i s \cos \theta - y_i s \sin \theta + x_0 \quad (1.10)$$

$$y_w = x_i s \sin \theta + y_i s \cos \theta + y_0. \quad (1.11)$$

Точка P_2 позволяет получить еще два уравнения. Для определения значений четырех параметров формулы преобразования координат необходимо решить полученную систему четырех уравнений.

Угол θ легко вычислить независимо от других параметров следующим образом. В системе координат I направление вектора P_1P_2 определяется, как $\theta_i = \arctg((^i y_2 - ^i y_1) / (^i x_2 - ^i x_1))$. В системе координат W этот вектор направлен под углом $\theta_w = \arctg((^w y_2 - ^w y_1) / (^w x_2 - ^w x_1))$. Искомый угол поворота равен разности двух этих углов: $\theta = \theta_w - \theta_i$. После вычисления θ в решаемые уравнения можно подставить значения $\sin \theta$ и $\cos \theta$. В результате останутся три уравнения с тремя неизвестными, которые легко решить относительно неизвестных s , x_0 и y_0 [27].

1.4.2. Аффинные преобразования в трехмерном пространстве

Аффинные преобразования в трехмерном пространстве широко применяются не только в трехмерном машинном зрении, но и в робототехнике, в системах виртуальной реальности [22]. Основными преобразованиями являются перенос, поворот, масштабирование и сдвиг. Для удобства вычислений используются однородные координаты, т.е. вместо трехмерных координат точки $[P_x, P_y, P_z]$ работают с ее однородными координатами $[sP_x, sP_y, sP_z, s]$ (где s – ненулевой масштабный множитель, обычно $s = 1$).

Системы координат необходимы для введения количественных характеристик расположения точек в пространстве. На рис. 1.12 показана сцена, в которой определены четыре различные системы координат.

Таким образом точка P , вершина пирамиды, имеет четыре различных координатных представления. Во-первых, точка описывается в модельной системе координат M как $^M P = [^M P_x, ^M P_y, ^M P_z] = [b/2, b/2, \text{корень из } 2/2b]$, где b

– сторона основания пирамиды. Расположение пирамиды в мировом пространстве показано на рис. 1.12. Координаты вершины пирамиды в мировой системе координат можно записать так:

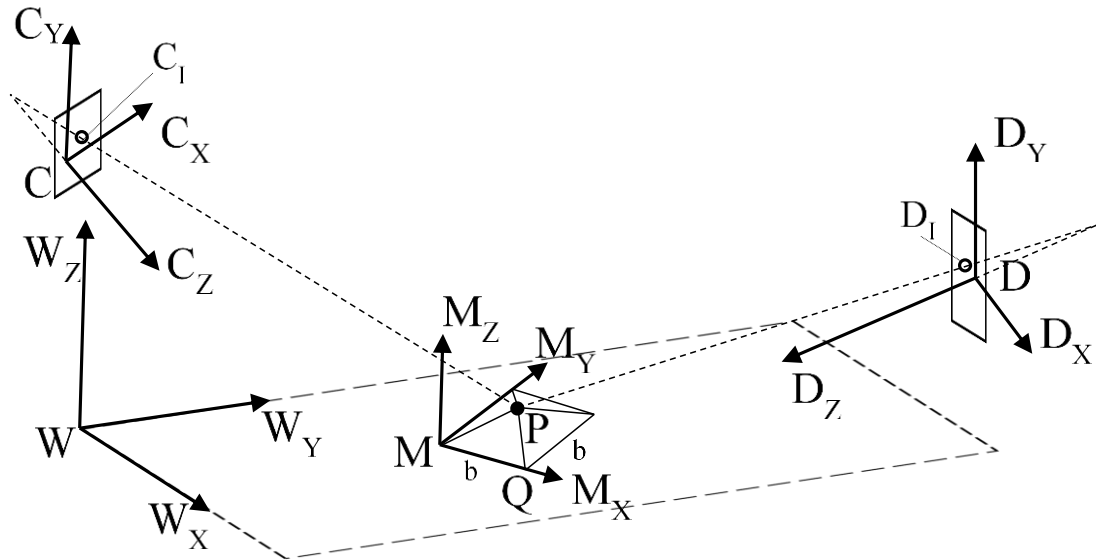


Рис. 1.12. Точка P имеет различные координаты в четырех различных системах координат

$${}^wP = [{}^wP_x, {}^wP_y, {}^wP_z] = TR \left[\frac{b}{2}, \frac{b}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}b \right], \quad (1.12)$$

где TR – это комбинация поворота и переноса системы координат M относительно системы координат W . Наконец, если два датчика C и D видят пирамиду с разных сторон рабочего стола, то отношение «слева-справа» между точками P и Q в двух системах координат различно, т. е. ${}^CP = [{}^CP_x, {}^CP_y, {}^CP_z] \neq {}^DP = [{}^DP_x, {}^DP_y, {}^DP_z]$.

Для определения расположения датчиков относительно друг друга и относительно трехмерных объектов сцены, а также для записи правил манипуляции с их координатами необходимы математические методы для работы с координатами точек в различных системах координат. Эти же методы позволят описать движение объекта в пространстве. Иногда мы будем использовать удобную форму записи для обозначения системы координат, в которой описывается точка, и «направления» преобразования

координат [4]. Например, преобразование точки модели $^M P$ из модельной системы координат в мировую систему координат $^W T$ обозначим: $^W P = {}^W_M T {}^M P$.

При переносе компоненты вектора переноса x_0, y_0, z_0 складываются с координатами точки $^1 P$ в системе координат 1 для получения координат точки $^2 P$ в системе координат 2. В примере на рис. 1.14 требуется выполнить некоторый перенос (и поворот), чтобы связать точку в системе координат модели и ее мировые координаты:

$$^2 P = T(x_0, y_0, z_0) {}^1 P \quad (1.13)$$

$$^2 P = \begin{bmatrix} {}^2 P_x \\ {}^2 P_y \\ {}^2 P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1 P_x \\ {}^1 P_y \\ {}^1 P_z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1.14)$$

С помощью матрицы трехмерного масштабирования по каждому из направлений системы координат можно задать различные масштабные множители. Иногда все они одинаковы, например, при замене единиц измерений или при однородном масштабировании для получения экземпляра модели заданного размера.

$$^2 P = S {}^1 P = S(s_x, s_y, s_z) {}^1 P \quad (1.15)$$

$$\begin{bmatrix} {}^2 P_x \\ {}^2 P_y \\ {}^2 P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x {}^2 P_x \\ s_y {}^2 P_y \\ s_z {}^2 P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1 P_x \\ {}^1 P_y \\ {}^1 P_z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1.16)$$

Наиболее просто записывается матрица поворота вокруг одной из координатных осей. Векторами-столбцами этой матрицы будут компоненты преобразованных единичных векторов (т. е. после поворота). Любое трехмерное линейное преобразование полностью определяется результатами преобразования трех базисных векторов. Поворот вокруг оси OZ похож на 2-мерное преобразование, за исключением того, что оно теперь сохраняет

координату z у трехмерной точки. На рис. 1.13 показано, как преобразуются единичные вектора при элементарных поворотах вокруг координатных осей.

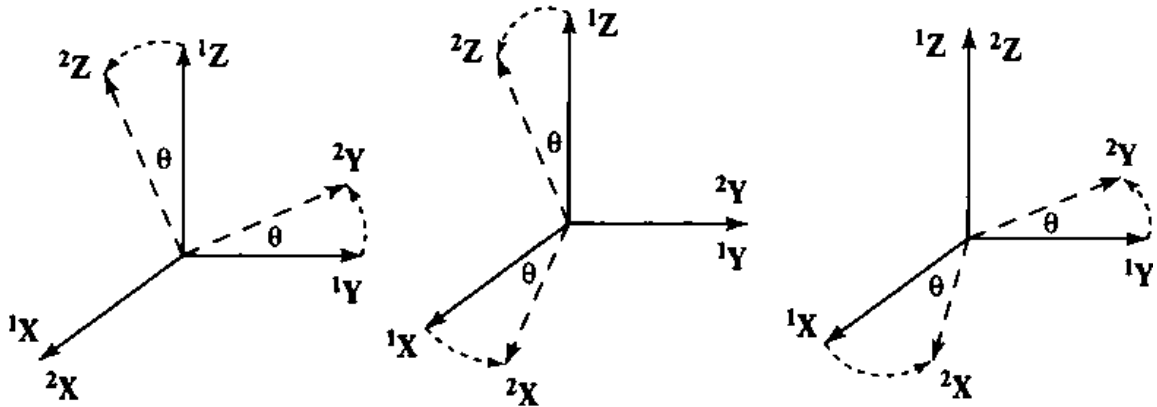


Рис. 1.13. Повороты на угол θ вокруг оси OX (слева), OY (в центре) и OZ (справа)

Поворот на угол θ вокруг оси OX :

$${}^2P = R({}^1X, \theta) {}^1P \quad (1.17)$$

$$\begin{bmatrix} {}^2P_x \\ {}^2P_y \\ {}^2P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1P_x \\ {}^1P_y \\ {}^1P_z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1.18)$$

Поворот на угол θ вокруг оси OY :

$${}^2P = R({}^1Y, \theta) {}^1P \quad (1.19)$$

$$\begin{bmatrix} {}^2P_x \\ {}^2P_y \\ {}^2P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1P_x \\ {}^1P_y \\ {}^1P_z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1.20)$$

Поворот на угол θ вокруг оси OZ :

$${}^2P = R({}^1Z, \theta) {}^1P$$

$$\begin{bmatrix} {}^2P_x \\ {}^2P_y \\ {}^2P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1P_x \\ {}^1P_y \\ {}^1P_z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1.21)$$

Поворот вокруг произвольной оси можно представить в виде уравнения (1.21). Матрица коэффициентов r_{ij} является ортонормированной: все ее строки (и столбцы) являются взаимно ортогональными единичными векторами. Все матрицы элементарных поворотов (вокруг координатных осей) также обладают этим свойством. Любой поворот в трехмерном пространстве можно представить в виде поворота на некоторый угол θ вокруг некоторой оси A . Это может быть произвольная ось, не обязательно совпадающая с одной из координатных осей. Чтобы убедиться в этом, предположим, что базисный вектор 1X преобразуется в другой вектор 2X . Ось вращения A можно найти, вычисляя векторное произведение 1X и 2X . В случае, когда вектор 1X не изменяется при повороте, этот вектор совпадает с осью вращения.

$${}^2P = R({}^1A, \theta) {}^1P \quad (1.22)$$

$$\begin{bmatrix} {}^2P_x \\ {}^2P_y \\ {}^2P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1P_x \\ {}^1P_y \\ {}^1P_z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1.23)$$

В качестве следствия можно отметить: результат движения твердого тела с момента времени t_1 до t_2 можно представить с помощью одного вектора переноса и одной матрицы поворота, независимо от формы траектории тела между указанными моментами времени. Для хранения параметров переноса и поворота достаточно одной матрицы преобразования в однородных координатах: в этой матрице 9 элементов задают поворот и 3 элемента – перенос:

$$\begin{bmatrix} {}^2P_x \\ {}^2P_y \\ {}^2P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1P_x \\ {}^1P_y \\ {}^1P_z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1.24)$$

Рассмотрим задачу совмещения модели треугольника с треугольником, построенным по данным измерений [28]. Этот пример убедительно продемонстрирует

необходимость точного вычисления параметров преобразований. Данный

пример можно будет использовать в качестве

основы для совмещения любой модели твердого тела с измеренными точками по соответствию трех точек.

Задача будет решаться алгебраически с

использованием основных преобразований, которые

были рассмотрены выше. Ход решения иллюстрируется

геометрическими построениями на рис. 1.14 и

рис. 1.15.

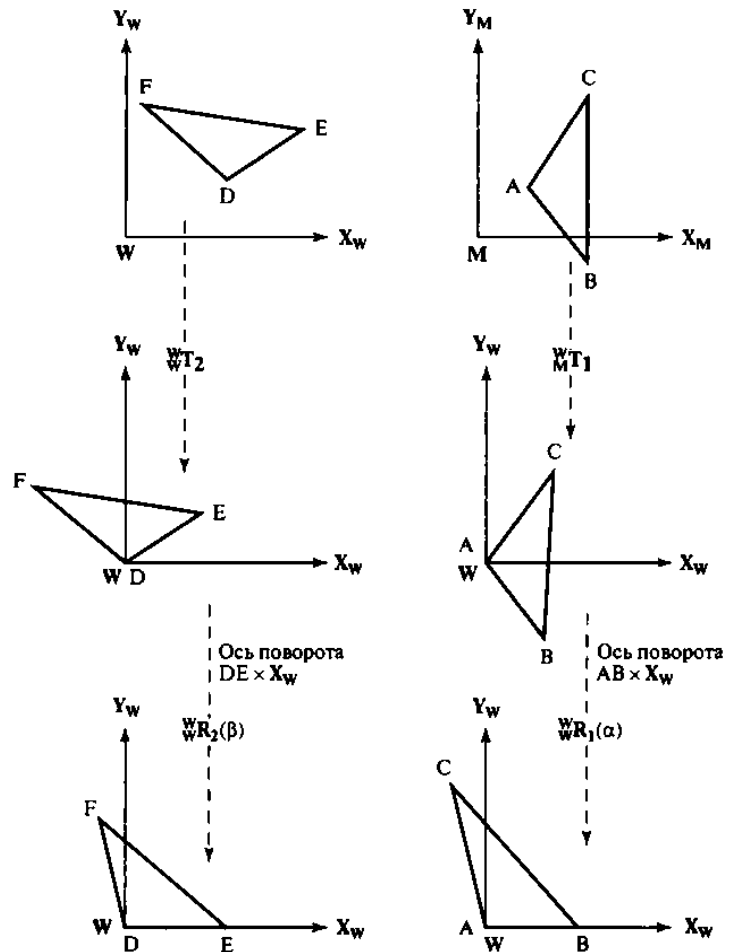


Рис. 1.14. Часть I: Совмещение двух конгруэнтных треугольников. $\triangle ABC$ является модельным треугольником, $\triangle DEF$ – треугольником, полученным в результате измерений

Задача заключается в том, что надо найти такое преобразование ${}^W_M T$, которое преобразует вершины модельного треугольника A, B и C в вершины конгруэнтного треугольника D, E, F в рабочем пространстве.

Преобразуем оба треугольника так, чтобы сторона AB попала на ось ${}^W O^W X$, и чтобы весь треугольник лежал в плоскости $X^W Y^W$ мировой системы координат W . В такой конфигурации вершины A и D

будут совпадать, то же можно сказать про B и E , C и F . Уравнение преобразования, выполняющего указанное совмещение вершин, можно переписать таким образом, чтобы получить искомое преобразование ${}^W_M T$, отображающее точки ${}^M P_i$ в соответствующие точки ${}^W P_i$.

Вычисление параметров преобразования ${}^W_M T$, совмещающего точки модели A, B, C с измеренными точками в мировой системе координат D, E, F , включает в себя следующие шаги:

- ввод трехмерных координат трех точек модели A, B, C и соответствующих измеренных точек D, E, F ;
- построение преобразования переноса ${}^W_M T_1$, обеспечивающего попадание модельной точки A в начало мировой системы координат W . Построение преобразования переноса ${}^W_W T_2$, обеспечивающего попадание измеренной (в мировой системе координат) точки D в начало мировой системы координат. Таким образом, на этом шаге выполнено совмещение точек A и D в системе координат W ;

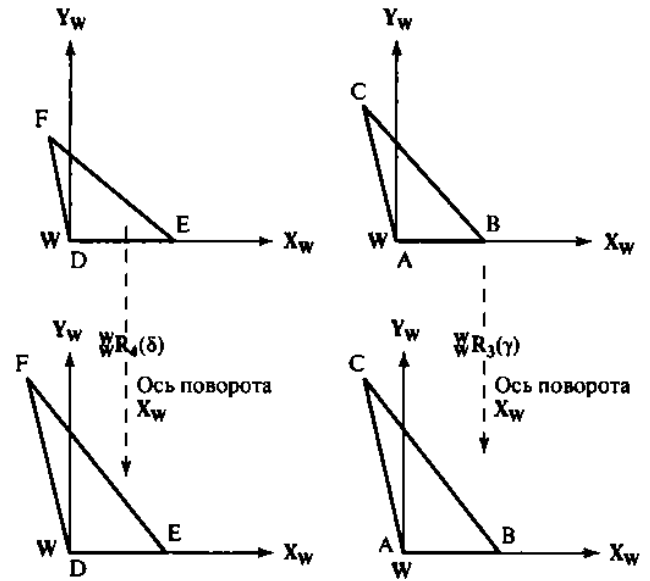


Рис. 1.15. Часть II: Продолжение процедуры совмещения двух конгруэнтных треугольников. Каждый треугольник поворачивается так, чтобы треугольник оказался в плоскости $X^W Y^W$. Осью вращения является ось OX

- построение преобразований поворота ${}^W R_1$ и ${}^W R_2$ для совмещения сторон AB и DE с осью X . Таким образом, выполнено совмещение сторон AB и DE в системе координат W ;
- построение преобразований поворота ${}^W R_3$ и ${}^W R_4$ для помещения точек C и F на плоскость XY . Теперь все три пары точек совмещены в системе координат W ;
- модельный треугольник и треугольник, построенный по результатам измерений в мировой системе координат, совмещены. Это выражается уравнением:

$${}^W R_3 {}^W R_1 {}^W T_1^M P_1 = {}^W R_4 {}^W R_2 {}^W T_2^W P_1 \quad (1.25)$$

$${}^W P_i = (T_2^{-1} R_2^{-1} R_4^{-1} R_3 R_1 T_1)^M P_i; \quad (1.26)$$

- в качестве результата работы алгоритма возвращается преобразование

$${}^W_M T = (T_2^{-1} R_2^{-1} R_4^{-1} R_3 R_1 T_1). \quad (1.27)$$

Очевидно, что каждая операция может быть выполнена и для каждой операции существует обратная. Теоретически, любые два конгруэнтных твердых тела можно совместить, совместив любые три соответствующие точки. На практике ошибки измерений и вычислительные погрешности могут привести к значительным ошибкам. Обычно для совмещения объектов применяется процедура оптимизации, использующая большее количество точек [87].

1.5. Краткие выводы к главе 1

В главе описывается проведенный анализ научно-технической литературы по вопросам позиционирования в помещении. Рассмотрены существующие системы позиционирования, использующие радиоканал для ориентации в помещении, ИК-маяки, УЗ-маяки. Установлено, что

использование радиоканала для работы в помещении является проблематичным в связи с наличием помех и переотражений сигнала, которые сказываются на точности работы.

Анализ показал, что наиболее надежным для работы в помещении является канал в видимом диапазоне электромагнитного спектра. Такие системы работают с использованием устройств и алгоритмов прикладного телевидения. Рассмотрены известные в открытых источниках системы, работа которых основана на использовании телекамер и систем технического зрения. Основной проблемой существующих технологий позиционирования в помещении, работающих на основе прикладных телевизионных систем, является их привязка к рабочему фону, например, к интерьеру или предъявляются требования к монотонному фону для использования цветowych маяков.

На основании проведенного анализа для ориентации в помещении предлагается использование маяков с цветовой кодировкой в качестве опорных точек и телевизионной измерительной системы для расчета расстояния до этих точек. Использование маяков с цветовой кодировкой предложено, в связи с предположением о возможности работы в условиях неоднородного фона, в отличие от существующих систем. Для подтверждения данных предположений в диссертационной работе проводятся соответствующие исследования.

Также в главе рассмотрены алгоритмы цифровой обработки изображений: задачи распознавания образов, фильтрации телевизионных изображений, работа с различными цветовыми системами. Описана теория трехмерных преобразований координат для перехода из одной системы координат в другую.

2. МЕТОДИКА РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПО МАЯКАМ С ЦВЕТОВОЙ КОДИРОВКОЙ

2.1. Вводные замечания

Анализ существующих систем в предыдущей главе показал, что прикладные телевизионные системы могут быть использованы для определения местоположения в помещении объекта, на котором расположена телекамера, и с которого ведется наблюдение. Такая система должна ориентироваться по неким реперным точкам, в роли которых могут быть использованы, будь то текстовые ориентиры или ориентиры с информацией, закодированной в специальном виде (например, QR-коды). В данной работе предлагается использовать специальные цветные маяки.

В системах позиционирования в помещении применение метода ориентации с использованием прикладных телевизионных систем является предпочтительным в связи с отсутствием помех, в отличие от систем, использующих радиоканалы в качестве опорной информации для позиционирования. На радиоканалы могут накладываться помехи от внешних источников радиоизлучения, а также помехи, связанные с переотражением радиосигналов в замкнутом пространстве.

Использование цветных маяков в сравнении с QR-кодами или явной текстовой информацией имеет преимущество, если рассматриваются динамические системы, в которых объект с установленной телекамерой должен перемещаться по помещению. В таких случаях, изображение, приходящее с телекамеры, может получиться смазанным, что является критичным для QR-кодов, в которых информация заложена в границах черных и белых областей (смазывание пагубно скажется на качестве получаемой информации, в худшем случае QR-код не будет распознан). Это характерно и для явной текстовой информации, которая не может быть распознана на смазанном изображении. Маяки с цветовой кодировкой избавлены от этого недостатка.

2.2. Основные требования к системе и оборудованию

Основные задачи в работе системы по определению местоположения методами цифровой обработки телевизионного изображения можно описать следующим образом:

1. распознавание в потоковом видео заданного количества трехцветных маяков,
2. определение их местоположения в пространстве относительно матрицы камеры (через построение относительной карты),
3. нахождение координат автономной МРП на абсолютной карте.

2.2.1. Выбор формы маяка и накладываемые ограничения

При разработке формы маяка было определено число цветовых областей: их целесообразно выбрать в количестве – 3. Это связано с тем, что при использовании 2-х цветовых областей на маяке имеет место низкая надежность правильного распознавания маяка, т.к. имеются всего две области, некоторое расстояние между ними. Оценить уникальное взаимное расположение данных областей на неоднородном цветном фоне тяжело. Возможный фон, насыщенный областями разного оттенка, будет давать большое количество ложных срабатываний. Напротив, анализ взаимного расположения 3-х цветовых областей позволяет отфильтровать схожие по цвету обнаруженные области. Если говорить о использовании 4-х цветовых областей, при анализе это значительно повысит требования к ресурсам системы, при незначительном увеличении надежности распознавания.

При выборе формы маяка рассматривались три варианта: прямоугольная форма, с квадратными цветовыми областями, круговая, с тремя окружностями разного цвета и радиуса, а также цилиндрическая. В первую очередь выбор был сделан в пользу плоских маяков из-за удобства размещения и, которые не будут занимать рабочее пространство помещения. Это связано с тем, что форма маяка может быть нарушена из-за внешних факторов. Также он может быть сбит, перемещен и вносить тем самым

ошибку в работу системы. Поэтому цилиндрическую форму было решено исключить из рассмотрения.

При выборе формы маяка между круговыми областями и квадратными, расположенными на одной прямой, выбор был сделан в пользу вторых. Это связано с тем, что анализ телевизионного изображения с квадратными областями требует меньше вычислительных ресурсов по сравнению с круговыми. Для кругового маяка, после обнаружения одной области требуется подбор эллипса, который максимально верно опишет форму данной цветовой области. После чего строятся оси к подобранному эллипсу и определяется его центр. Затем определяется взаимное расположение центров трех эллипсов по каждому цвету (центры должны находиться в одной точке). Для распознавания прямоугольного маяка после обнаружения квадратной области требуется найти её центр, как среднее арифметическое координат $[x, y]$ всех пикселей данной области. Затем оценить взаимное расположение 3-х областей, например, они могут быть расположены на одной прямой линии. Вертикальная ориентация маяка является предпочтительной, поскольку высота маяка является важным критерием в работе алгоритма. Движение мобильной роботизированной платформы происходит в горизонтальной плоскости и такое расположение позволяет сохранить данный параметр неизменным. При горизонтальном расположении маяка проекция высоты (горизонтали маяка) будет меняться при различных углах обзора.

В соответствии с проведенным анализом определена следующая форма маяка: цветные маяки представляют собой прямоугольный плоский объект, с уникальной комбинацией трех квадратных цветовых областей, расположенных в непосредственной близости друг от друга на одной линии (рис. 2.1). Такими цветовыми областями в самом простом случае могут быть наклейки разных цветов, нанесенные на одну поверхность.



Рис. 2.1. Пример цветового маяка

Стоит упомянуть о том, что количество цветовых областей также задает масштаб системы. Если учесть, что каждый цветовой маяк является уникальным и имеет заранее заданные координаты, то он должен быть и уникальным с точки зрения цветовой кодировки. Таким образом, количество возможных маяков равно числу перестановок цветовых областей:

$$N = k ! \quad (2.1)$$

где k – число цветов, используемых на маяках.

На маяки накладываются следующие жесткие ограничения, определяющие работоспособность алгоритма в принципе [46, 83]:

- все три цвета на маяке должны быть визуальным образом хорошо разделены;
- центры цветовых областей должны располагаться на одной прямой и должны быть равноудалены друг от друга;
- поверхность маяков должна быть матовой (не бликовать).

Кроме того, плоскость маяка должна быть перпендикулярна оптической оси объектива. С этой точки зрения вертикальное расположение маяков также является предпочтительным, так как расстояние между цветовыми областями не будет меняться при перемещении автономной МРП по горизонтали.

Расположение цветовых маяков должно быть в зоне возможной прямой видимости телекамеры, с учетом угла обзора объектива. Они могут располагаться, например, на стенах и объектах помещения. Зачастую маяки располагаются на уровне оптической оси телекамеры.

2.2.2. Выбор цветовой схемы маяка и подбор характеристик объектива телекамеры

Так как работа алгоритма основана на цвете, то идеальным вариантом выбора цветов для маяка являются цвета, равноудаленные друг от друга по шкале оттенка (hue для цветовой системы HSV), т.е. расположенные под углом 120° друг от друга (рис. 2.2). В этом смысле предпочтительна работа с цветовой схемой HSV. Примером таких цветов могут стать красный (hue – 0; 360), зеленый (hue – 120), синий (hue – 240) [35].

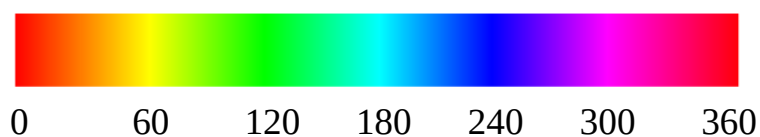


Рис. 2.2. Шкала оттенка (в градусах)

Для телекамер, используемых на мобильных платформах, главным условием является наличие цветности. Разрешение матрицы не является столь критичным фактором, так как алгоритм способен распознавать маяки даже при низком разрешении и расфокусированном объективе. Однако, объектив должен быть высокого качества, чтобы давать минимум нелинейных искажений изображения, таких, как дисторсия (рис. 2.3). Дисторсия (подушкообразная и бочкообразная) сильно влияет на точность измерения расстояний. Фокусное расстояние должно быть фиксированным в процессе работы алгоритма [76].

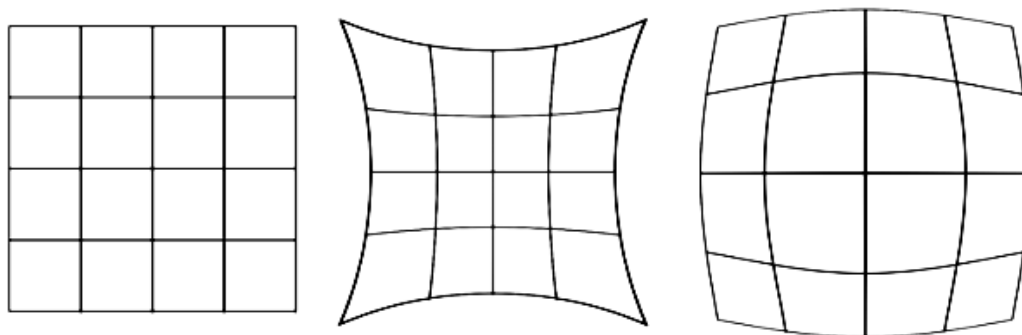


Рис. 2.3 Примеры подушкообразной и бочкообразной дисторсий

Еще одним важным условием является соблюдение горизонтальности оптической оси объектива. В алгоритме принимается, что телекамера на МРП может вращаться только вокруг своей вертикальной оси, за счет этого обеспечивается корректное вычисление координаты z на абсолютной карте.

2.3. Метод определения координат с помощью маяков с цветовой кодировкой на входном телевизионном изображении

2.3.1. Структурная схема и описание этапов работы системы позиционирования

Система позиционирования включает в себя телевизионную камеру, устанавливаемую на автономную МРП, приемо-передающий модуль и расчетный модуль (рис. 2.4). На расчетном модуле имеется предустановленное ПО: алгоритм распознавания маяков и алгоритм позиционирования. Также на расчетном модуле содержится информация о цветах, используемых на маяках, размере маяков, и их уникальных координатах, и цветовой кодировке.

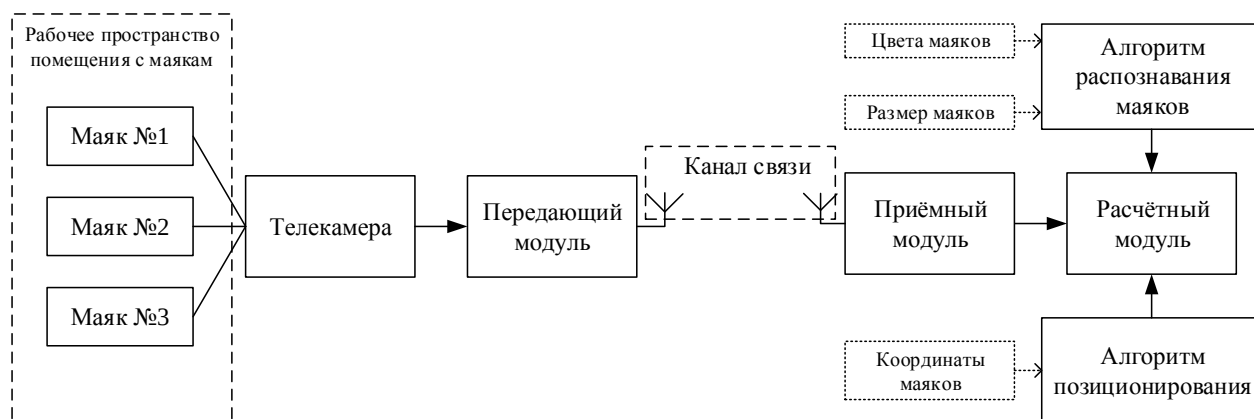


Рис. 2.4. Структурная схема системы позиционирования

Коротко рассмотрим работу системы позиционирования в целом:

1. На вход поступает телевизионное изображение.

2. Входное телевизионное изображение проходит процедуру предобработки. Сначала каждый кадр фильтруется фильтром Гаусса (для сглаживания дефектов изображения и удаления шумов матрицы) [47, 63].

3. Изображение конвертируется из цветовой модели RGB (красный, зеленый, синий) в цветовую модель HSV (оттенок, насыщенность, яркость). Это сделано с целью облегчения дальнейшей обработки изображения, так как в модели HSV работа с цветами проходит более надежно [24].

4. Для выделения отдельного цвета на изображении применяется гладкая непрерывная функция (своя для каждого канала цветовой схемы HSV), что позволяет получить «цветовую маску» для каждого цвета маяка. Затем распознанные цвета проходят проверку на соответствие ограничениям, накладываемым на маяк (центры цветовых областей должны располагаться на одной прямой и должны быть равноудалены друг от друга) с заданной точностью. Пункты 2 – 4 представляют собой алгоритм распознавания цветовых маяков. Он будет подробно рассмотрен ниже, в п. 2.3.2.

5. Зная угол обзора объектива телекамеры и габариты маяков, определяются их относительные координаты на основе модели перспективной проекции [87] и строится относительная карта (рис. 2.5). Относительная карта в данном алгоритме представляет собой систему координат телекамеры. Телекамера располагается на начале координатной плоскости. На относительной карте точками отмечается местоположение цветовых маяков и их координаты. По осям отложены расстояние относительно камеры в метрах. По оси ординат откладывается расстояние параллельно оптической оси объектива. По оси абсцисс расстояние относительно камеры параллельно плоскости объектива телекамеры. Относительные координаты маяков вычисляются алгоритмом в декартовой системе координат, исходя из относительного размера маяков на входном изображении.

Следующим шагом, путем преобразования координат определяются абсолютные координаты расположения в помещении автономного

мобильного робота, а также строится абсолютная карта [73]. Абсолютная карта (рис. 2.6) – это изображение с планом помещения или пространства, по которому движется автономная МРП. К ней жестко «привязывается» декартова система координат. Начало абсолютной координатной плоскости может быть привязано к любой точке помещения, в зависимости от задачи и удобства работы. Например, это может быть один из углов помещения. Отсчет в данной координатной плоскости ведется в метрах. По осям абсолютных координат откладывается расстояние, характеризующее помещение, в котором движется МРП.

6. Полученные абсолютные координаты используются для позиционирования в помещении. Пункты 5 и 6 представляют алгоритм позиционирования, который подробно будет рассмотрен в п. 2.3.3.

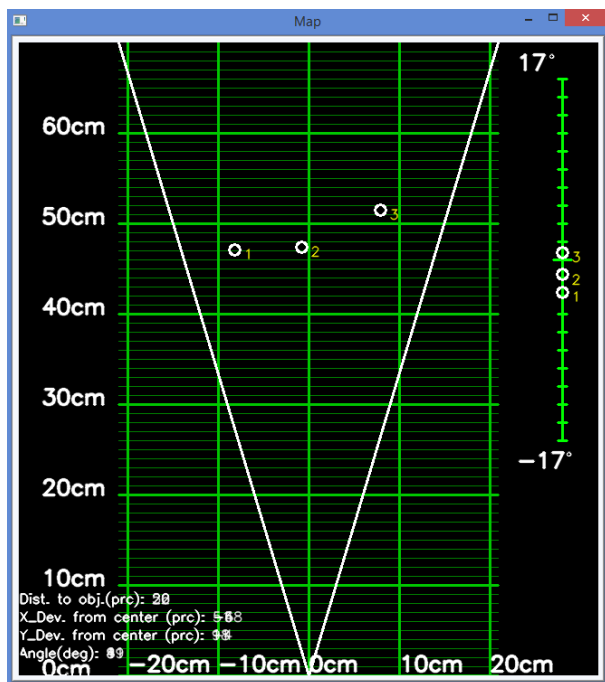


Рис. 2.5. Относительная карта

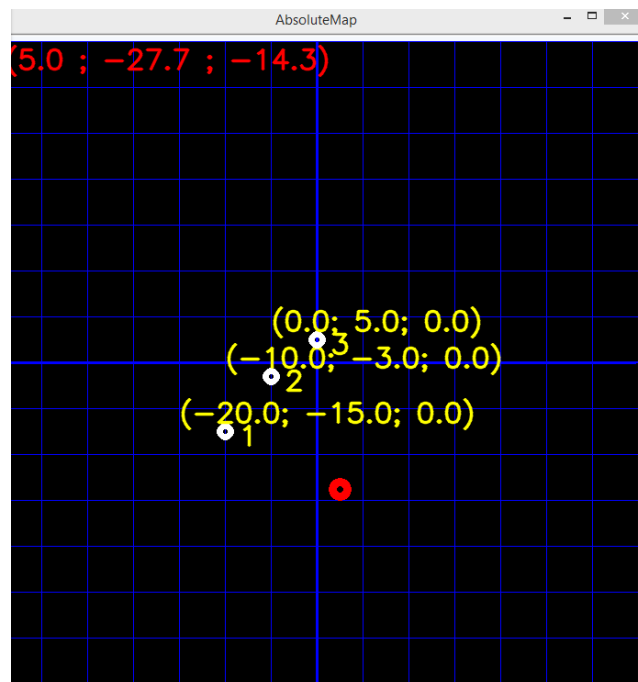


Рис. 2.6. Абсолютная карта

2.3.2. Описание работы алгоритма распознавания маяков с цветовой кодировкой

На первом этапе предобработки изображения применяется фильтр Гаусса. Использование данного фильтра связан с тем, что вместо присвоения

всем пикселям фильтра равных весов (как при усредняющем фильтре) предпочтительнее выбрать веса такими, чтобы они уменьшались с увеличением расстояния входных пикселей от центрального пикселя $I[x_c, y_c]$. Подобные весовые коэффициенты как раз имеет фильтр Гаусса, который, возможно, является наиболее широко используемым фильтром [8].

При применении фильтра Гаусса значение пикселя $[x, y]$ взвешивается с использованием весовой функции:

$$g(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.2)$$

где $d = \sqrt{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}$ – представляет расстояние пикселя $[x, y]$ от центрального пикселя окрестности $[x_c, y_c]$ на выходном изображении, для формирования которого применяется фильтр.

Затем изображение конвертируется из системы RGB в систему HSV. Для этого используется следующая форма преобразования:

$$\begin{cases} H = \arccos \frac{2R-G-B}{\sqrt{6[(R-1/3)^2 + (G-1/3)^2 + (B-1/3)^2]}}, \\ S = 1 - 3 \min(R, G, B), \\ V = R + G + B. \end{cases},$$

После фильтрации с использованием фильтра Гаусса и конвертации цветовой модели из RGB в модель HSV изображение попадает в алгоритм распознавания (рис. 2.7), где изображение проходит операцию по построению «цветовой маски» маяка. Данная операция позволяет успешно отделять области одного цвета друг от друга для дальнейшего распознавания цветового маяка.

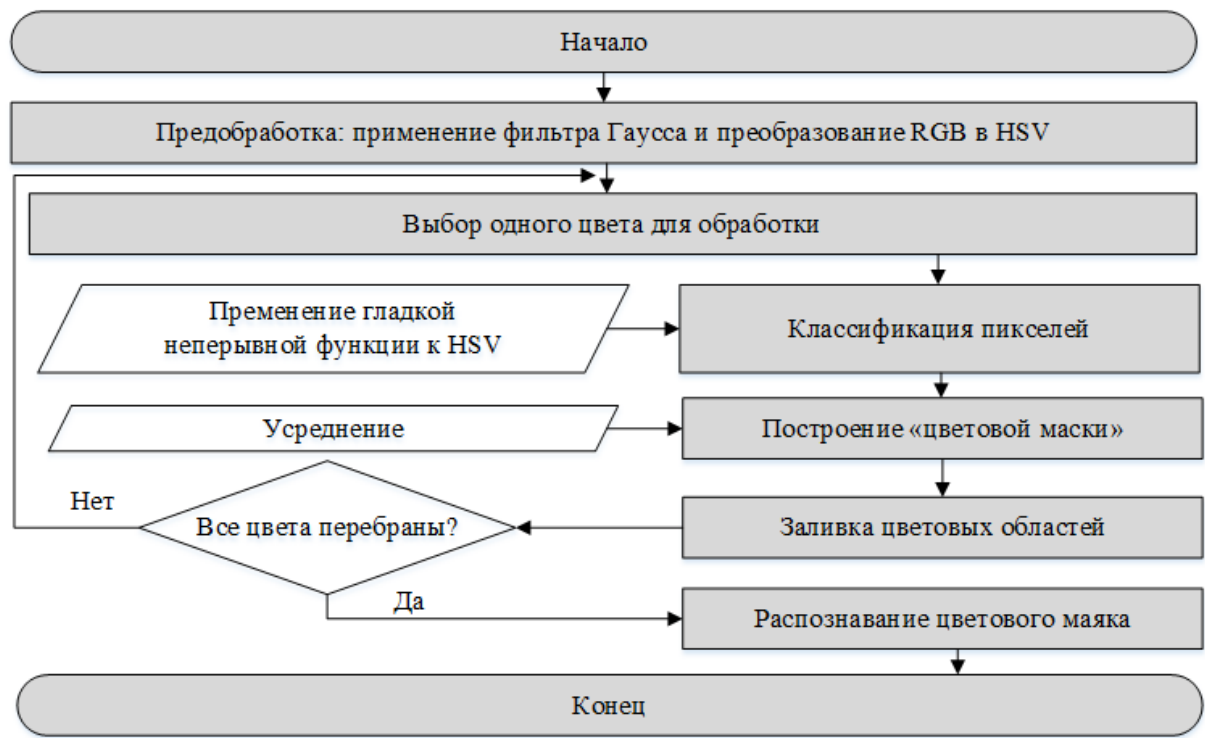


Рис. 2.7. Блок-схема алгоритма распознавания цветных маяков

Первым шагом по работе обнаружения цветных областей происходит выбор одного из необработанных цветов маяка, над которым будет продолжаться работа. После этого алгоритм проводит классификацию пикселей входного изображения путем применения гладкой непрерывной функции. Работа ведется с каждым каналом цветовой схемы HSV отдельно: для насыщенности и яркости применяется логистический сигмоид с варьируемыми параметрами кривизны k и смещения Δ [6]:

$$f(x) = \frac{255}{1 + \exp(-k(x - m + \Delta))} \quad (2.3)$$

для оттенка применяется гауссов колокол с варьируемой дисперсией D :

$$f(x) = 255 \exp\left(-\frac{(x - m)^2}{2D}\right), \quad (2.4)$$

где m – это значение, соответственно, насыщенности, яркости или оттенка, полученное из заранее заданных цветов, используемых на цветных маяках (рис. 2.8). Использование плавно изменяющихся функций вместо

«пороговых» оправдывается повышением стабильности и устойчивости работы алгоритма [41].

На выходе функции получается три изображения в градации серого со значениями пикселей от 0 до 255.

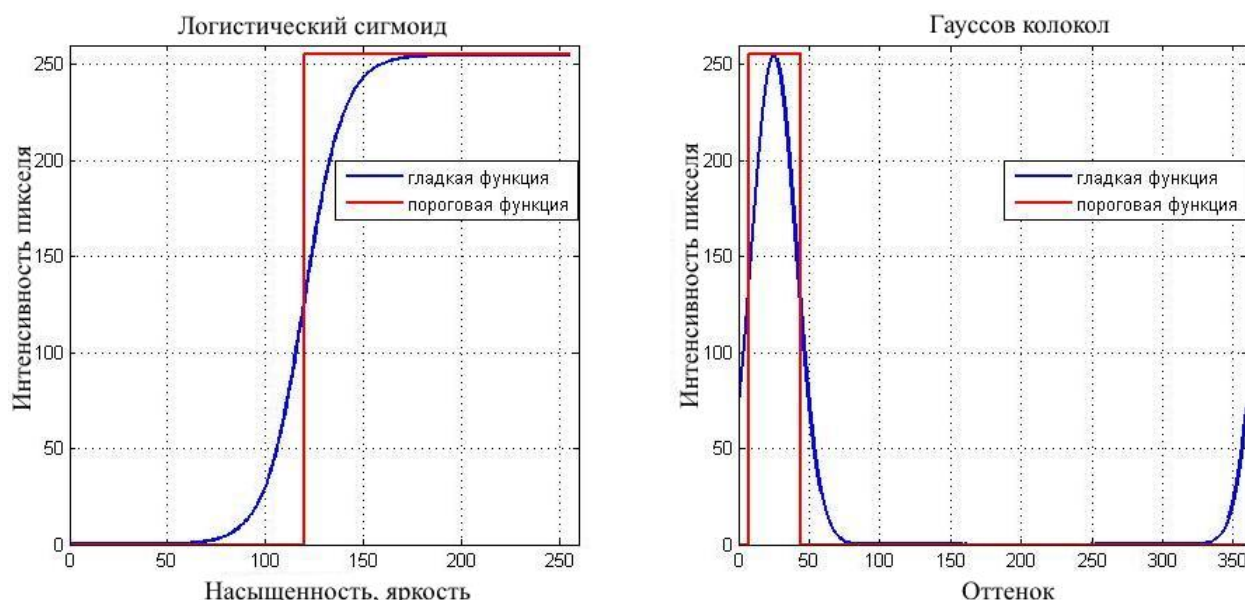


Рис. 2.8. Функции, используемые при классификации пикселей

Для повышения быстродействия было сделано очень важное усовершенствование. Вместо того, чтобы вычислять значения функций логистического сигмоида и гауссова колокола для каждого пикселя изображения, значения этих функций вычисляются только один раз и записываются в одномерный массив длиной 256. Номер элемента массива соответствует интенсивности пикселя, а значение элемента – значению пороговой функции. Таким образом, за один запуск алгоритма определяются только $3N$ массивов, где N – число маяков.

В интерфейсе программы, написанной для работы с алгоритмом, могут задаваться параметры, определяющие порог по классификации цвета (рис. 2.9).

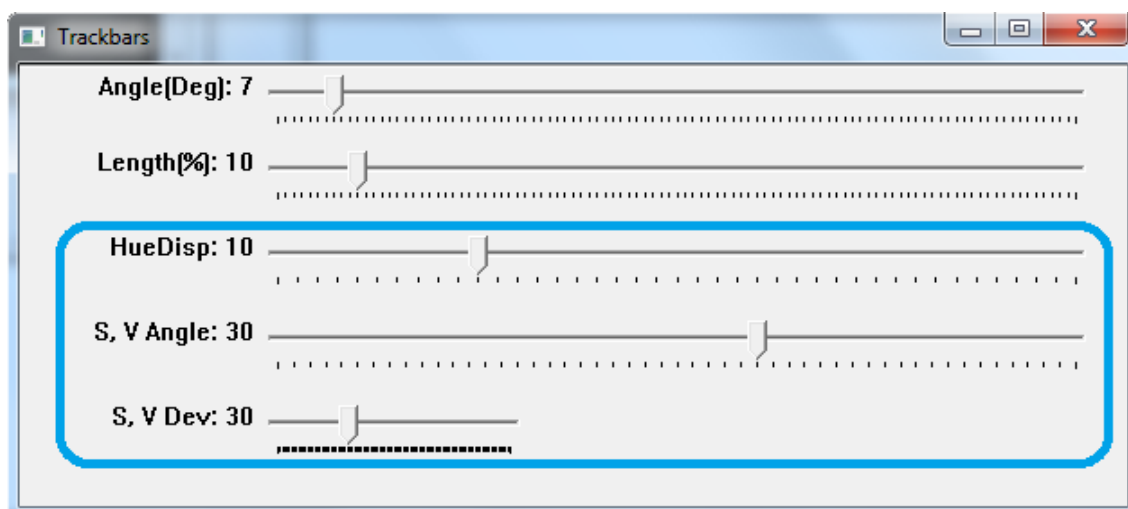


Рис. 2.9. Интерфейс программы по настройке параметров работы с цветами маяков

Параметр HueDisp определяет ширину гауссова колокола путем регулирования параметра дисперсии из формулы (2.4) для оттенка цветовой модели HSV.

Параметр S,V Angle определяет кривизну k логистического сигмоида в формуле (2.3) для насыщенности и яркости цветовой модели HSV.

Параметр S,V Dev определяет смещение Δ логистического сигмоида в формуле (2.3) для насыщенности и яркости цветовой модели HSV.

Затем, полученные три изображения в градациях серого от каждого канала цветового пространства HSV, попиксельно усредняются, для получения одного изображения, учитывающего все три характеристики выбранного цвета – оттенка, насыщенности и яркости. Это изображение называется «цветовой маской» для одного конкретного цвета, и оно представлено в оттенках серого (рис. 2.10).

Усреднение интенсивности пикселей можно проводить несколькими способами [12]:

а) среднее арифметическое. Данный способ усреднения является самым быстросействующим и простым с точки зрения программной реализации, но он не учитывает физических особенностей цвета.

$$\bar{X} = \frac{X_H + X_S + X_V}{3}, \quad (2.5)$$

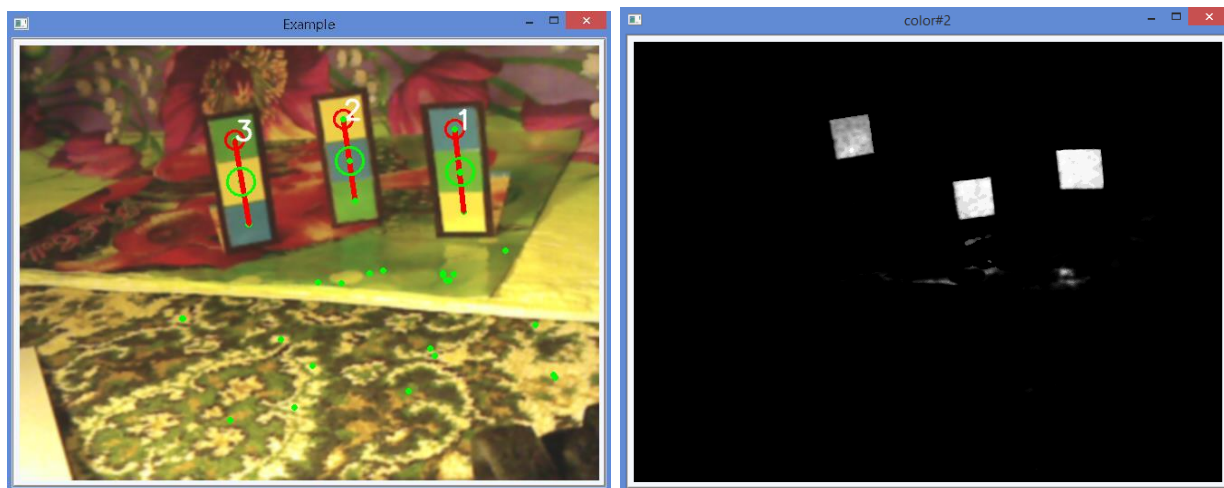


Рис. 2.10. Пример построения маски одного из цветов

где x – интенсивность пикселя.

б) Среднее арифметическое взвешенное.

$$\bar{X} = w_H X_H + w_S X_S + w_V X_V, \quad (2.6)$$

при этом $w_H + w_S + w_V = 1$. w – вес.

в) Среднее геометрическое. Данный способ усреднения является более ресурсозатратным, но он и более эффективный в борьбе с шумами на изображении. Это связано с тем, что если хотя бы один из трех усредняемых пикселей является нулевым, то и результат усреднения тоже получается нулевым (чего не происходит при арифметическом усреднении). В результате изображение получается не зашумленным и с четким выделением цветовых областей.

$$\bar{X} = \sqrt[3]{X_H \cdot X_S \cdot X_V} \quad (2.7)$$

г) Среднее геометрическое взвешенное.

$$\bar{X} = X_H^{w_H} \cdot X_S^{w_S} \cdot X_V^{w_V}, \quad (2.8)$$

при этом $w_H + w_S + w_V = 1$, w – вес. При таком усреднении оттенок берется с большим весом, чем насыщенность и яркость ($w_H > w_S, w_V$), а последние – с равными весами ($w_S = w_V$).

В алгоритме распознавания усреднение проводилось с помощью среднего геометрического взвешенного. Данный выбор был сделан в связи с тем, что при этом способе усреднения учитываются особенности цвета, а именно оттенок берется с большим весом, чем насыщенность и яркость ($w_H > w_S, w_V$), а последние – с весами, равными: $w_S = 2 w_V$. Это сделано потому, что цвет – главный критерий работы алгоритма распознавания, который в системе HSV кодируется двумя значениями цветности: оттенком H и насыщенностью S . Оттенок характеризует цвет области, насыщенность – чистоту цвета. Яркость характеризует интенсивность света и связана с параметрами источника света, а не свойствами поверхности.

На пятом этапе алгоритма «Распознавания цветowych маяков» (рис. 2.7) на «цветовой маске» определяется пиксель с максимальным значением интенсивности и вокруг него «заливается» область из пикселей, значение интенсивности которых удовлетворяет условию

$$1 \leq x \leq x_{\max} + 200, \quad (2.9)$$

где x – интенсивность данного пикселя, $x_{\max}$ – интенсивность пикселя, с которого начинается «заливка» (интенсивность пикселей нормирована на величину 255).

Применение данного условия и 8-связной области при «заливке» позволяет хорошо отделять области одного цвета друг от друга.

Данная процедура повторяется несколько раз, при этом ранее «залитые» пиксели никак не учитываются во время «заливки» новых областей. Итерации продолжаются до тех пор, пока общая залитая площадь не превысит 90% от площади изображения, либо пока количество областей с площадью, меньшей, чем 100 пикселей, меньше некоторого порога (по умолчанию 10 областей). Данные ограничения введены с целью предотвращения зависания алгоритма из-за обработки большого количества мелких элементов, схожих по оттенку с маяком. Максимальное число залитых областей может варьироваться в зависимости от условий функционирования системы.

Вычисляются координаты центра каждой залитой области и записываются в память. Координаты $[x, y]$ центра области на изображении определяются, как среднее арифметическое координат x и y всех точек (пикселей) обнаруженной залитой области. На изображении центр каждой залитой области помечается точкой (рис. 2.11).

Затем в алгоритме происходит проверка: все ли цвета, используемые на маяках, перебраны. Если «да» система переходит дальше к распознаванию маяков с заданной точностью. В случае, если есть ещё необработанные цвета, система возвращается к пункту 2. Таким образом, пункты со 2 по 6 повторяются для каждого из заданных цветов.

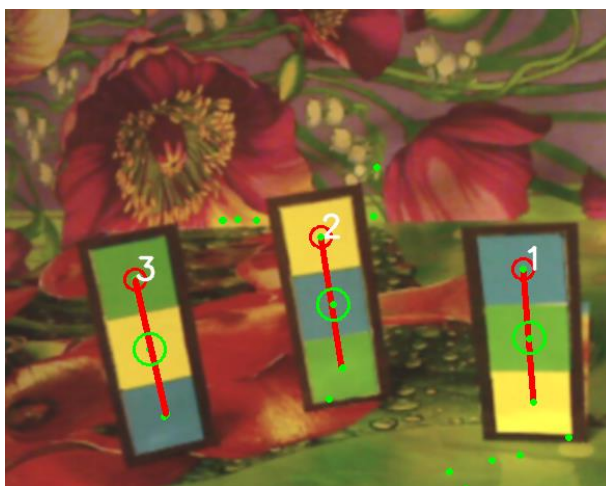


Рис. 2.11. Распознанные цветовые области и их геометрические центры

После определения всех возможных центров цветовых областей маяков, находящихся в кадре, вычисляются длины и углы наклона (относительно друг друга) векторов, соединяющих центры залитых областей. Причем вектора определяются только между верхней (top) и средней (middle) цветовыми областями и между средней и нижней (bottom). Всего векторов $(n_m(n_t + n_b))$, где n_k – количество областей k -го цвета. Всего $(n_t \cdot n_m \cdot n_b)$ комбинаций двух векторов могут дать «скелет» искомого трехцветного маяка (рис. 2.12). Построение всех возможных векторов идет сверху вниз, с учетом, что на одном маяке не может быть двух одинаковых цветов. И далее

определяется, какая из найденных комбинаций подходящая, об этом можно судить по разнице в длинах и углах двух векторов, соединяющих три цветовых области маяка. Если эти разности меньше заданного порога, то цветовые области, относящиеся к этим векторам, помечаются как искомый маяк.

Объекты n'_m и n'_b на изображении являются либо ложно классифицированными цветовыми областями маяка (любой цветовой объект помещения, совпадающий с заданными цветами маяков, находящийся в кадре), либо областью соседнего маяка. Накладываемые на маяки ограничения позволяют успешно отфильтровать данные объекты «цветовой маски» (рис. 2.13).

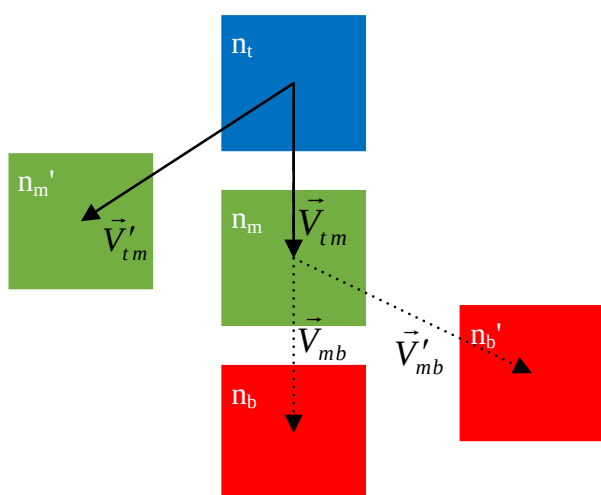


Рис. 2.12. Всевозможные комбинации векторов



Рис. 2.13. Пример работы алгоритма распознавания цветных маяков

В интерфейсе программы, написанной для работы с алгоритмом, определяются параметры порога по распознаванию маяков (рис. 2.14).

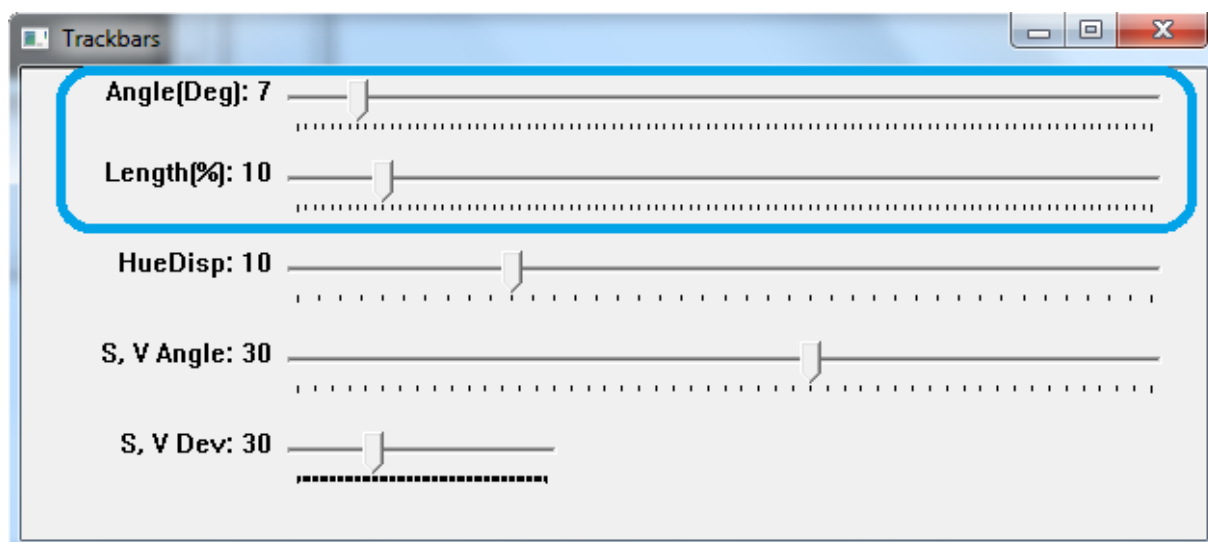


Рис. 2.14. Интерфейс программы по настройке параметров работы со скелетом маяков

Параметр Angle(Deg) определяет угол между двумя векторами $\vec{V}_{tm}$ и $\vec{V}_{mb}$ в градусах. Параметр Length(%) определяет допустимую разницу в длинах векторов $\vec{V}_{tm}$ и $\vec{V}_{mb}$. В случае, если какой-либо из параметров превышает предельно допустимое значение, то система помечает данную комбинацию маяков как «не маяк».

2.3.3. Описание работы алгоритма позиционирования

На последнем этапе работы системы позиционирования рассчитываются относительные координаты маяков, абсолютные координаты телекамеры и строятся соответствующие карты (рис. 2.15).

Относительная карта в данном алгоритме представляет собой изображение, на котором точками отмечается местоположение цветowych маяков и их относительные координаты (рис. 2.5). Относительные координаты маяков вычисляются путем измерения расстояния до маяков от объектива телекамеры, исходя из относительного размера маяков на входном изображении [78]. По ним отрисовывается местоположение маяка относительно телекамеры (координаты x , y) и уровень по вертикали, на котором виден маяк (координата z), относительно оптической оси камеры. То есть объектив камеры – это начало координат, оптическая ось объектива –

это ось y , горизонтальная прямая из начала координат – ось x , вертикальная – ось z .

Для вычисления трехмерных координат маяков необходимо задать несколько априорных величин – это высота маяка, равная расстоянию между центрами двух крайних цветковых областей, угол обзора объектива телекамеры и разрешение изображения. Обязательным условием является равенство высот всех маяков, одновременно присутствующих в кадре, причем высоты маяков могут варьироваться, в зависимости от специфики решаемой задачи. Т. е. высота маяка является параметром, задаваемым пользователем перед запуском алгоритма.

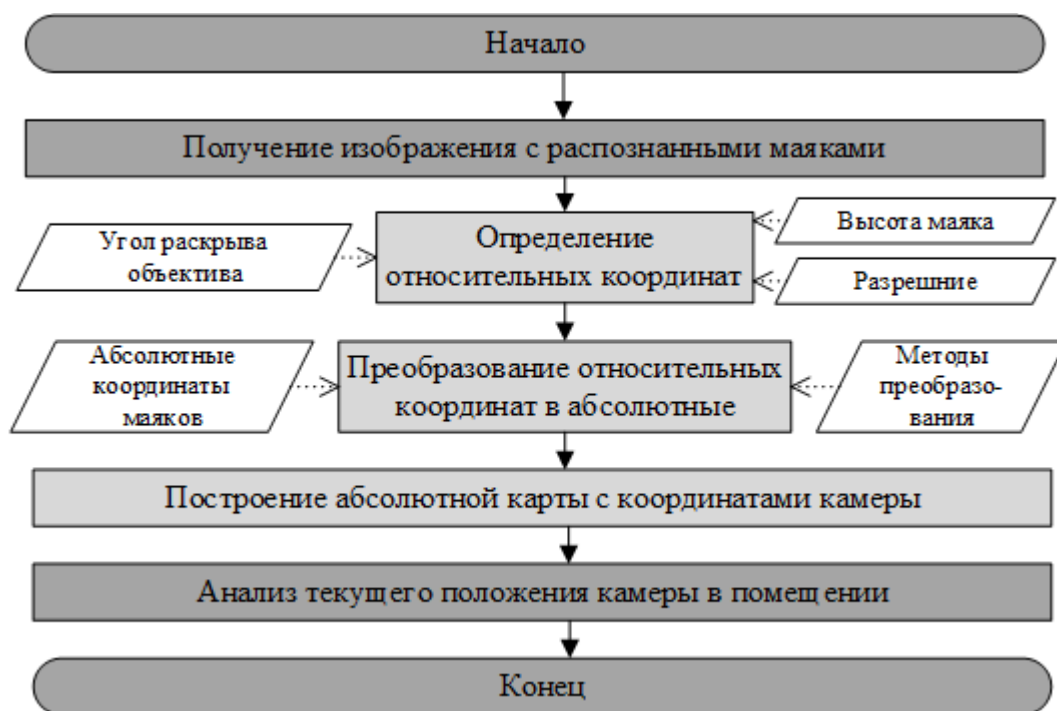


Рис. 2.15. Блок-схема алгоритма позиционирования

Угол обзора задается в виде тангенса половины угла обзора объектива, полученного из информации о технических характеристиках камеры. В случае отсутствия данного параметра, он может быть определен путем измерения опытным путем горизонта входного кадра. Измерения необходимо проводить именно по изображению, получаемому с телекамеры. Установлено, что это дает более высокую точность измерений [78].

Таким образом, угол обзора объектива – это постоянный параметр, присущий данному объективу. При смене объектива на автономной МРП или самой матрицы камеры необходимо изменить параметр угла обзора и в алгоритме. Разрешение входного изображения система считывает автоматически.

На рис. 2.16 показана схема определения расстояния от камеры до плоскости, в которой расположен распознанный маяк, где O – расположение объектива телекамеры, плоскость AB – плоскость, в которой расположен маяк, ED – плоскость формирования изображения или матрица телекамеры.

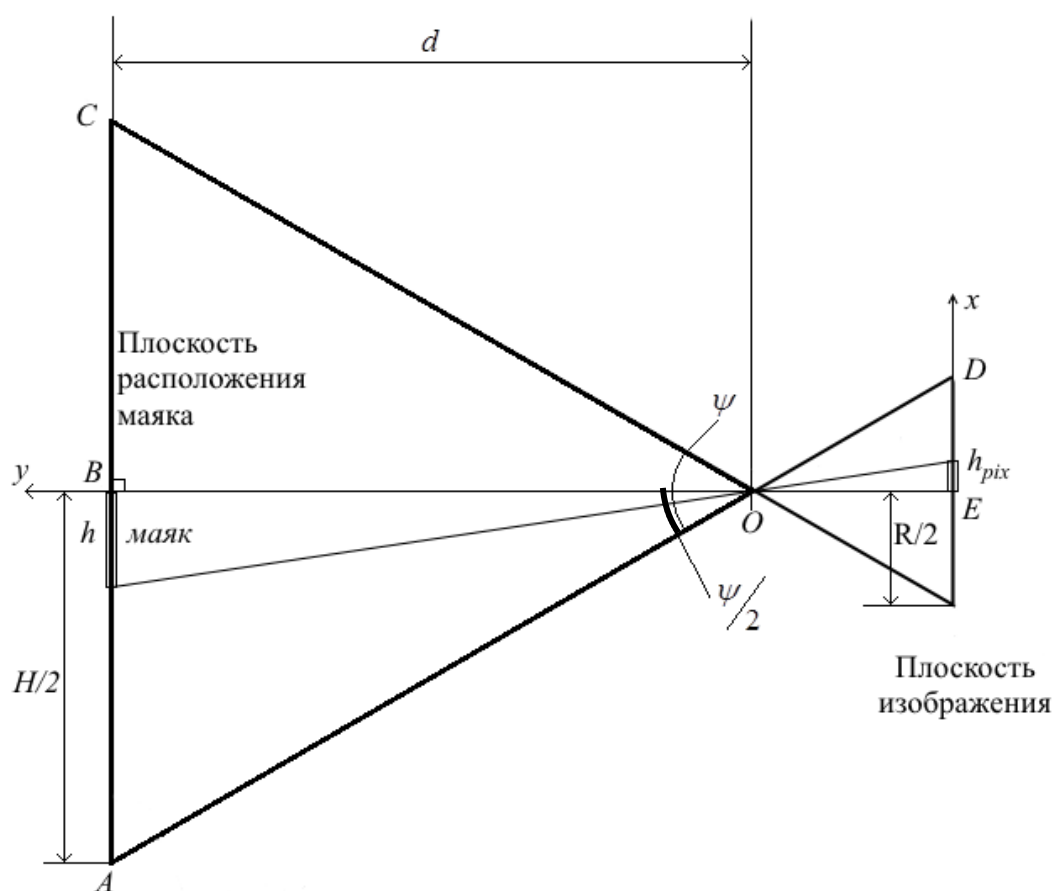


Рис. 2.16. Схема измерения расстояния от объектива телекамеры до плоскости, в которой расположен маяк

Для измерения расстояния от камеры до плоскости, в которой расположен маяк, учитывая, что камера откалибрована, для начала необходимо из подобных треугольников AOB и DOE записать следующее выражение:

$$\frac{h_{pix}}{R/2} = \frac{h}{H/2}, \quad (2.10)$$

где R – разрешение (число пикселей) изображения по высоте, пикс.;
 h_{pix} – относительна высота маяка на изображении, пикс.;
 H – расстояние в плоскости маяка между краями изображения, попадающего в кадр, м; h – реальная высота маяка, м.

Расстояние H может быть выражено через тангенс половины угла обзора объектива и расстояние от камеры до плоскости маяка:

$$H/2 = d \cdot \operatorname{tg}(\psi/2), \quad (2.11)$$

где ψ – угол обзора объектива телекамеры, градус, d – расстояние камера-плоскость маяка, м.

Подставив выражение 2.11 в 2.10 может определено расстояние d (рис. 2.16):

$$d = \frac{R/2}{\operatorname{tg}(\psi/2)} \cdot \frac{h}{h_{pix}}, \quad (2.12)$$

В формуле (2.12) определено расстояние от камеры до плоскости, в которой «лежит» маяк (координата y). Теперь необходимо провести измерения для определения координат x и z (рис. 2.17). Это может быть сделано также как в формуле 2.10:

$$x = x_{pix} \frac{h}{h_{pix}}, \quad z = z_{pix} \frac{h}{h_{pix}} \quad (2.13)$$

где x_{pix} – смещение маяка от оптической оси камеры по оси x в пиксельной системе координат на изображении, пикс.; x – смещение маяка от оптической оси камеры по оси x в относительной системе координат камеры, м; z_{pix} – смещение маяка от оптической оси камеры по оси z в пиксельной системе координат на изображении, пикс.; z – смещение маяка от оптической оси камеры по оси z в относительной системе координат камеры, м.

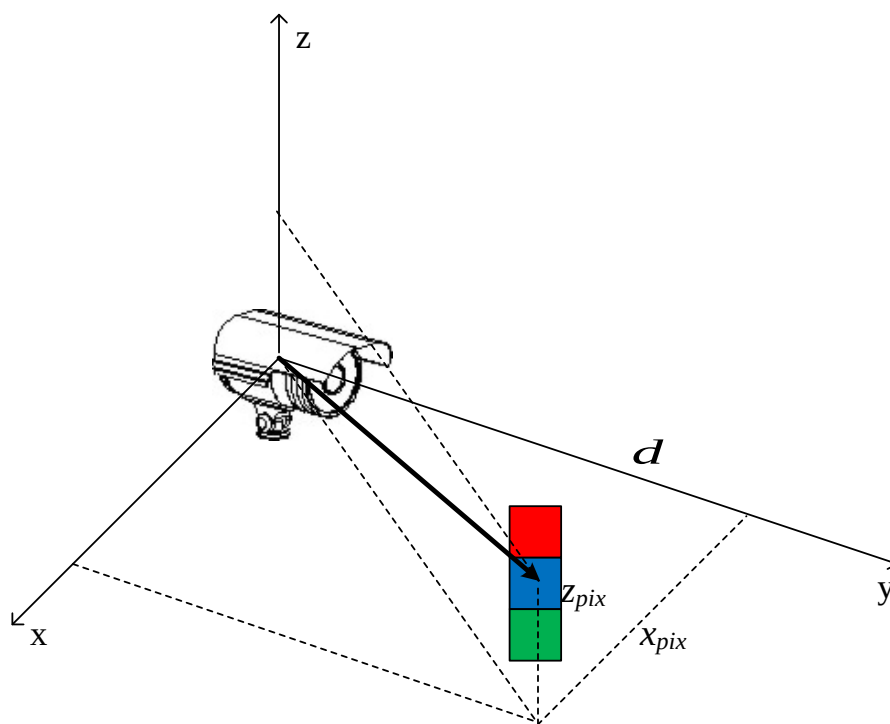


Рис. 2.17. Схема измерения расстояния камера-маяк

Таким образом, из (2.12) и (2.13) имеем 3 относительные координаты маяка. Данные измерения проводятся для всех маяков, находящихся в кадре.

Для получения местоположения МРП строится абсолютная карта. Абсолютная карта – это изображение с планом помещения или пространства, по которому движется автономная МРП (рис. 2.6). К ней жестко «привязывается» декартова система координат [51].

Переход к абсолютным координатам телекамеры обеспечивается через использование трехмерного преобразования относительных координат маяков. В алгоритме позиционирования в данной работе используется два метода преобразования координат: метод трехмерных аффинных преобразований (рис. 2.18) и метод градиентного спуска (рис. 2.19).

Метод аффинных преобразований представляет собой известный аналитический метод преобразования координат [87].

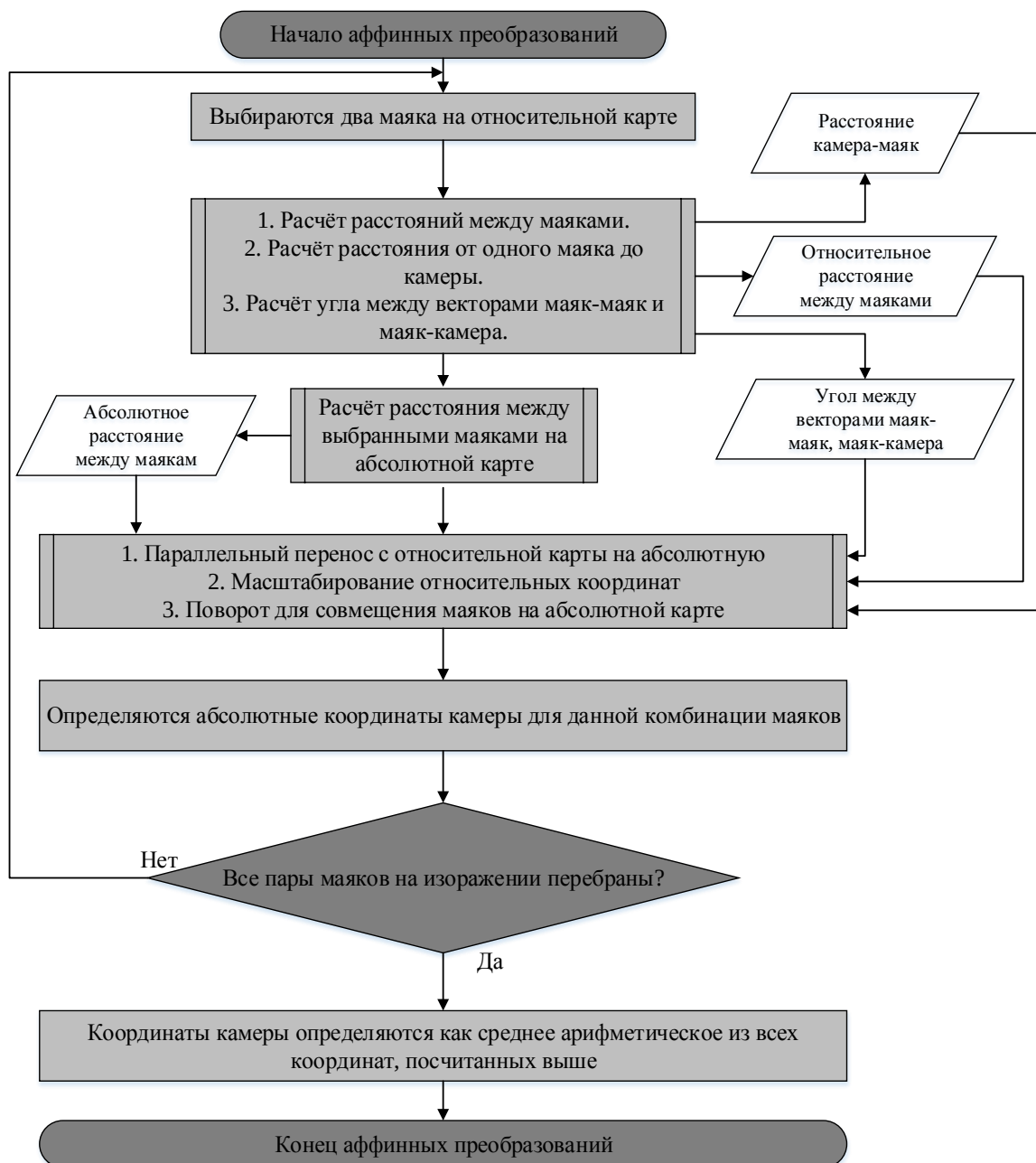
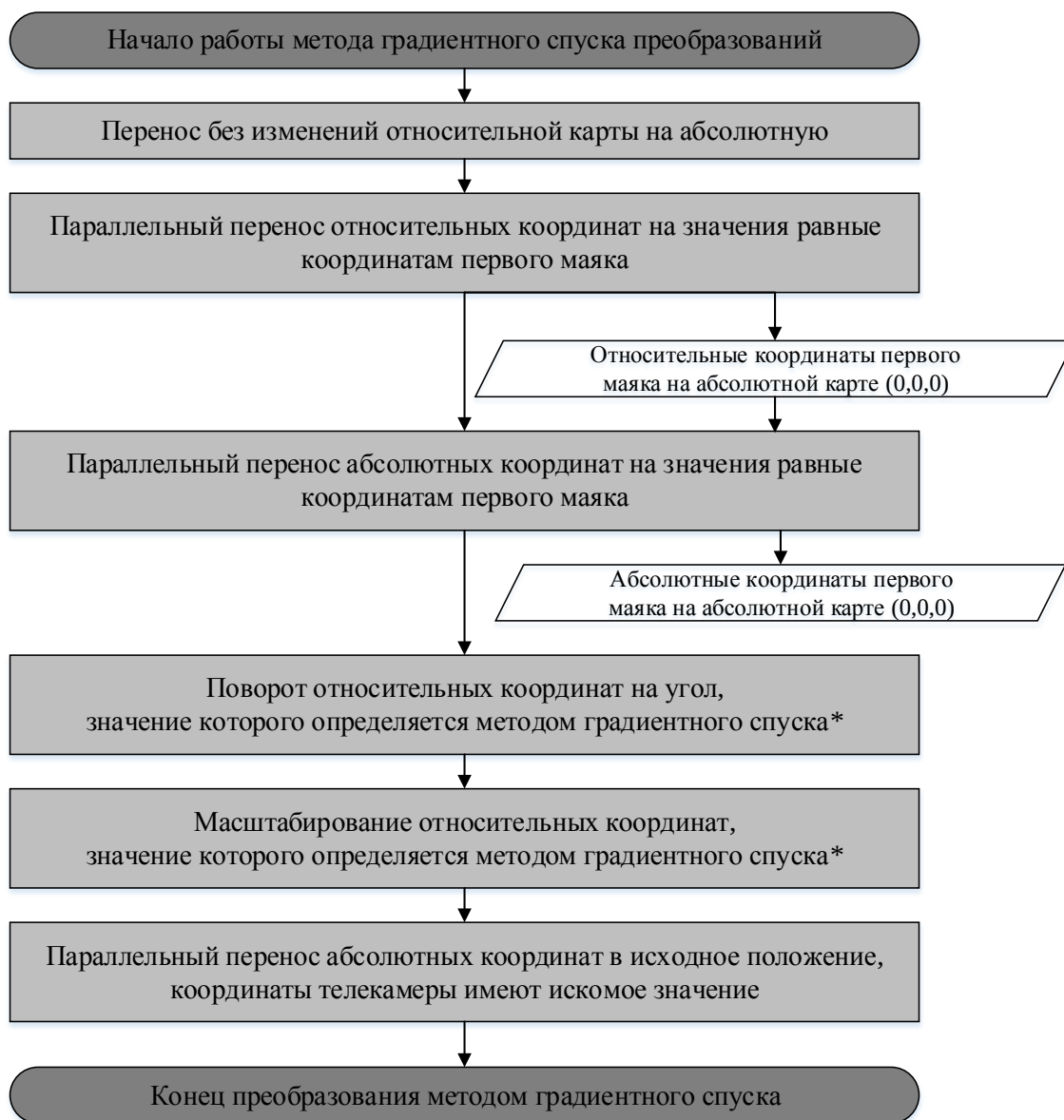


Рис. 2.18. Метод аффинных преобразований

Метод градиентного спуска рассмотрен в работе системы исходя из предположения, что заданный порог точности позволит достичь более высокой производительности системы, чем при аффинных преобразованиях координат. В 3 главе диссертационной работы приводятся исследования системы позиционирования для обоих методов преобразования.

Сравнение производительности двух методов приведены в п. 3.6 данной диссертационной работы.



*по достижении минимума среднеквадратичной ошибки (заданного порога) между относительными координатами выбранного маяка и абсолютными координатами (0, 0, 0) этого маяка

Рис. 2.19. Метод градиентного спуска

Данные преобразования позволяют перейти из системы координат камеры в мировую систему координат. Благодаря априорно заданным трем координатам для каждого маяка, которые однозначно характеризуют его положение в пространстве, путем преобразования относительных координат, определяются реальные координаты телекамеры (МРП).

Это процедура производится по данным, полученным на этапе построения относительной карты. В итоге, положение МРП и маяков отрисовывается на плане помещений и указываются их координаты. С использованием этих координат легко оценивается расстояние до маяков. Траектория движения автономной МРП записывается в память, также может быть указана точка на карте, куда требуется прибыть, и МРП выберет путь автоматически.

2.4. Усовершенствование алгоритма распознавания цветowych маяков

Система позиционирования МРП состоит из нескольких основных процессов – это обнаружение выбранных цветов на изображении, распознавание маяков, определение относительных координат цветowych маяков и, наконец, определение абсолютных координат камеры. Все эти этапы прошли исследование по различным параметрам и условиям функционирования.

Для части алгоритма, отвечающей за цветовой обнаружение, были найдены адекватные параметры, позволяющие обнаруживать цвета при различных внешних условиях освещения. В частности, был установлен вид кривых распознавания по оттенку (гауссов колокол) и насыщенности, яркости (два логистических сигмоида), которые позволяли однозначно определять нужный цвет без «расползания» на соседние цвета. При неправильно выбранных значениях дисперсии, кривизны и смещения для кривых цветowe области обнаруживаются с задним фоном, черными участками изображения или не обнаруживаются вовсе. Таким образом, для обнаружения оттенка цветовой модели HSV использовалось распределение Гаусса (4, п.2.3.2):

$$f(x) = 255 \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2D}\right)$$

для которого значение дисперсии было определено, как: $D = 10$. На примере зеленого цвета со значениями HSV = (120, 70%, 50%) распределение Гаусса для оттенка ($m = 120$) выглядит следующим образом (рис. 2.20):

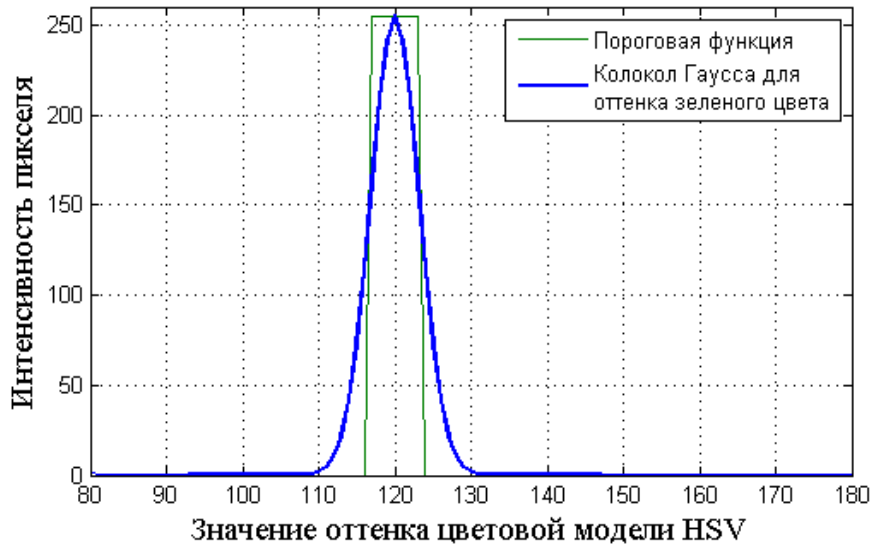


Рис. 2.20. Вид Гауссового колокола с настроенными параметрами для значения оттенка

Стоит отметить, что классически, значения канала H лежат в диапазоне 0–360, S – 0–100 и V – 0–100. При работе с библиотекой OpenCV значения всех каналов приведены к диапазону 0–255 для того, чтобы максимально задействовать размерность одного байта.

Для функции логистического сигмоида, которая применяется для насыщенности (3, п. 2.3.2):

$$f(x) = \frac{255}{1 + \exp(-k(x - m + \Delta))},$$

были определены следующие параметры:

- кривизна логистического сигмоида $k = 0,3$;
- смещение пороговой точки на логистическом сигмоиде $\Delta = 30$.

Логистический сигмоид для насыщенности на примере зеленого цвета (HSV:120, 70%, 50% – $m = 180$) имеет вид, приведенный на рис. 2.21, а.

Для яркости были определены отличные от насыщенности условия, поскольку данный канал HSV-пространства меньше всего влияет на

цветность: кривизна логистического сигмоида $k = 0,1$; смещение пороговой точки $\Delta = 50$ (при $m = 125$, рис. 2.21, б). Тем самым было минимизировано влияние возможного низкого уровня освещенности сцены.

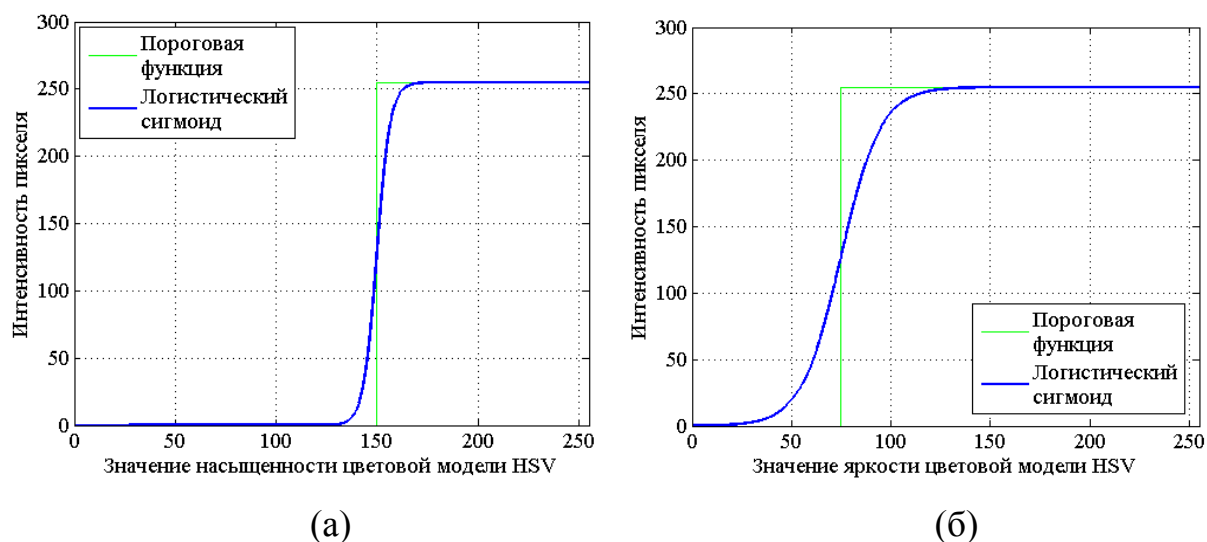


Рис. 2.21. Вид логистического сигмоида с настроенными параметрами для (а) насыщенности и (б) яркости

Для второй части алгоритма, отвечающей за распознавание маяков, были определены такие значения порогов для расстояний между цветовыми областями и углами между векторами, соединяющими их, которые позволяли максимально снизить вероятность ложных обнаружений, тем самым позволяя сохранить работоспособность алгоритма распознавания маяков при наличии неоднородного разноцветного фона. Подбор данных параметров обусловлен тем, что в случае, когда пороги будут заданы слишком низкими (то есть незначительное отклонение от идеальной формы маяка), то существует высокий риск не распознать маяк, даже получивший малые визуальные искажения вследствие дисторсии или изгиба самого маяка. Если же пороги слишком высоки, то возрастает вероятность распознавания сторонней цветовой области, как принадлежащей маяку. Благодаря эмпирически подобранным пороговым значениям ошибка распознавания маяков минимизирована. Были получены следующие результаты:

Разница между длинами векторов $\vec{V}_{tm}$ и $\vec{V}_{mb}$ не должна превышать 10%, для угла ω между векторами было определено значение в 7° (рис. 2.22).

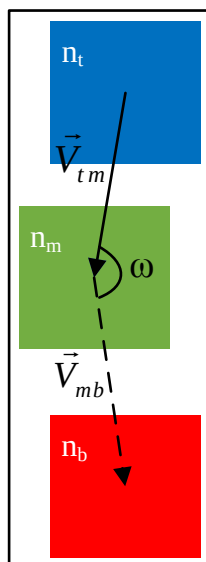


Рис. 2.22. Подбор параметров для векторов между цветовыми областями маяка.

Точность измерения расстояния до маяка зависит, в первую очередь, от точности распознавания маяка, то есть от точности определения координат геометрического центра маяка. Также она зависит от правильности задания угла обзора объектива телекамеры, установленной на МРП который, в общем случае, является константой. Другие факторы, влияющие на точность расчета относительных координат, в общем случае отсутствуют.

Для демонстрации возможностей алгоритма были сняты изображения с телекамеры при различных условиях освещения на неоднородном цветном фоне (рис. 2.23).

На приведенном примере видно, что алгоритм классифицирует схожие по цвету с маяком сторонние области, находящиеся в кадре телекамеры. Однако за счет анализа структуры возможного маяка система отсеивает данные сторонние области из-за несоответствия длинам векторов и углу между ними.

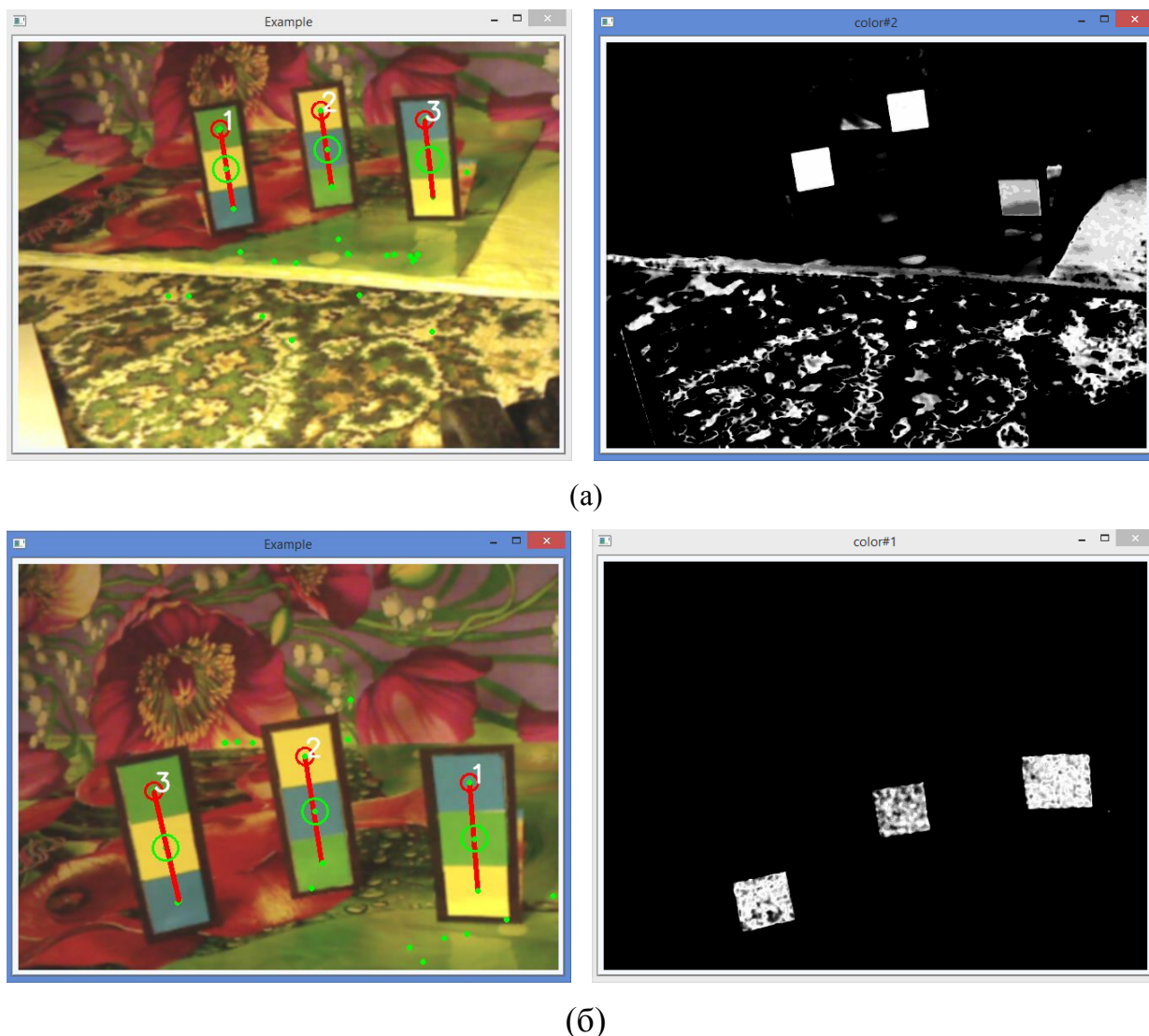


Рис. 2.23. Пример работы алгоритма распознавания цветowych маяков на неоднородном цветном фоне при различных условиях освещения. (а) – построение цветовой маски для желтой цветовой области; (б) – для области синего цвета

2.5. Требования при реализации системы позиционирования

Данная система предполагает работу телекамеры на мобильном роботизированном устройстве, для выполнения задач которого требуется позиционирование в помещении. Система позиционирования включает в себя: телекамеру, устройство передачи данных с телекамеры на расчетный модуль (канал Wi-Fi), расчетный модуль (ПК), программное обеспечение для анализа телевизионного изображения, предустановленное на ПК (ПО системы позиционирования).

Система предполагает эксплуатацию в помещении. Габариты телекамеры сравнимы с размерами стандартной офисной веб-камеры (приблизительный размер – 5х5х5 см). Потребляемая мощность камеры со встроенным модулем передачи данных – 6 Вт.

При установке данной системы на мобильную платформу для определения её местоположения не требуется больших трудозатрат. Основным вопросом при реализации является способ закрепления камеры на платформе и расположение ПК, для удобства работы. Основной сложностью данной системы стоит отметить необходимость создания интерфейса взаимодействия разработанной системы позиционирования в помещении и системы автоматического (или автоматизированного) управления мобильной платформой. Данный вопрос относится к задачам робототехники и к их системе управления.

Кроме того, в вопросе реализации системы позиционирования стоит упомянуть необходимость расположения маяков в помещении. Для правильной ориентации должна быть задана декартова система координат, которая жестко привязывается к плану помещения. Основной единицей такой системы координат являются метры. Маяки должны быть размещены в помещении на таких расстояниях и в таком количестве, которые учитывают угол обзора телекамер и размер используемых маяков. Для правильной работы системы, в базе данных информации о маяках задаются координаты для каждого маяка, его уникальная цветовая кодировка, а также набор цветов в системе HSV, которые используются на маяках в данном помещении.

Основные характеристики системы для создания готового решения приведены в табл. 2.1. Данные значения соответствуют характеристикам системы, которые были использованы при исследовании системы.

Табл. 2.1. Характеристики системы позиционирования в помещении

Характеристика	Значение	Дополнительная информация
Габариты телекамеры	50x50x20 мм	Может быть использована любая совместимая с ПК камера
Потребляемая мощность	6 Вт	Стандартное значение для камеры с Wi-Fi передачей данных
Разрешение изображения	640x480 пикселей	Разрешение может быть выбрано любым. Влияет на возможные рабочие масштабы системы
Угол обзора объектива	33,3°	Угол обзора влияет на возможности системы: охват окружающего пространства, дальность действия
Количество цветовых областей маяка	3 шт.	
Количество цветов для маяков	5 шт.	Указано максимальное значение, использованное при тестировании системы
Количество маяков	Определяется задачей	Данное значение зависит от поставленных задач, рабочего помещения, типа камеры
Быстродействие	10 кадр/с	Минимальная скорость при распознавании 3-х маяков
Максимальная точность измерения расстояний «камера-маяк»	$2,8 \pm 0,6$ мм	При использовании метода аффинных преобразований и распознавании 3-х маяков в кадре
Минимальная точность измерения расстояний «камера-маяк»	$6,1 \pm 0,7$ мм	При использовании метода градиентного спуска и распознавании 2-х маяков в кадре

2.6. Краткие выводы к главе 2

По результатам данной главы можно сделать следующие выводы:

- Введено понятие маяка с цветовой кодировкой и обозначены ограничения, определяющие работоспособность алгоритма.
- Разработан алгоритм распознавания маяков с цветовой кодировкой на входном телевизионном изображении, получаемом с телекамеры на основе цифровой обработки изображения. В основе алгоритма лежит построение «цветовой маски» с использованием гладкой непрерывной функции (логистического сигмоида и гауссова колокола) для выделения цветового признака маяка.

– Разработан алгоритм определения координат МРП на основе распознанных цветowych маяков на входных кадрах телевизионного изображения. Для нахождения координат МРП проводятся измерения по телевизионному изображению для определения относительных координат маяков в системе координат камеры. Строится относительная карта, которая путем трехмерного преобразования сводится к абсолютным координатам камеры в мировой системе координат. Это возможно благодаря заранее заданным абсолютным координатам цветowych маяков.

– Определены параметры фильтрации работы алгоритма распознавания маяков с цветowym кодом, позволяющие алгоритму оставаться работоспособным в условиях неоднородного фона. Параметры: дисперсия $D = 10$ гауссового колокола для фильтрации по оттенку, кривизна $k = 0,3$ и смещение пороговой точки на логистическом сигмоиде $\Delta = 30$ для насыщенности; кривизна логистического сигмоида $k = 0,1$ и смещение пороговой точки $\Delta = 50$ для яркости – позволяют проводить классификацию пикселей входного изображения по цветowому признаку, за счет чего определяются только области, соответствующие цветowym значениям цветowych областей маяков, в условиях переменного освещения.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

3.1. Вводные замечания

На работоспособность алгоритма позиционирования влияет множество факторов, которые способны ограничить работу системы, использующей данный алгоритм, некоторыми условиями или полностью сделать её невозможной. В связи с этим был определен ряд исследований, необходимых к проведению над системой, для того чтобы определить все возможные граничные условия, которые могут возникать в процессе работы алгоритма.

Фундаментом работы алгоритма является процедура распознавания цветов. Цветность области, обрабатываемая камерой, зависит не только от физических свойств отражающей поверхности, но и от спектра источника света, освещающего рабочую сцену. Поэтому одним из исследований было определено качество работы алгоритма при влиянии различных типов внешнего освещения. В исследованиях были использованы: ртутная кварцевая лампа – 6000К (рис. 3.1), естественное освещение в облачную погоду – примерное температурное значение 6667К, естественное освещение в солнечную погоду (прямые солнечные лучи) – примерное температурное значение 5000К, люминесцентная лампа холодного белого цвета – 4000К, лампа накаливания – 2677К (рис. 3.2). Хроматическая диаграмма цветовых температур приведена на рис. 3.3.

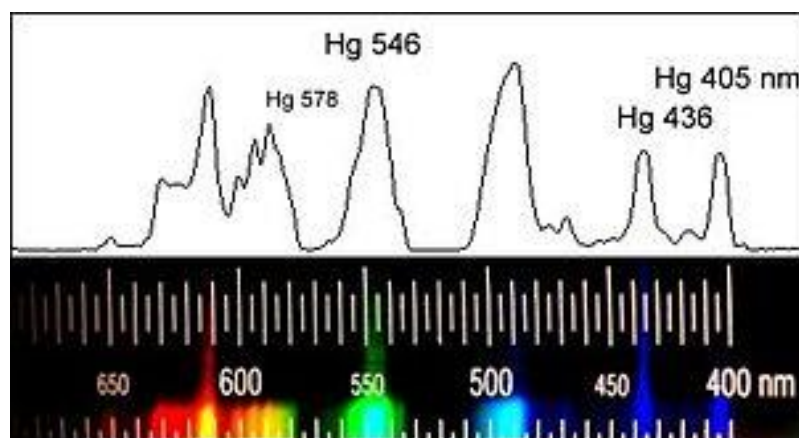
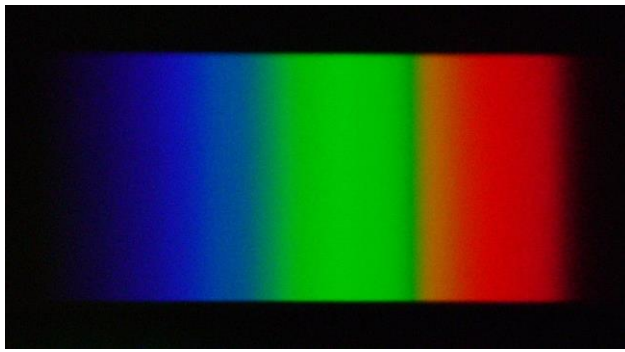
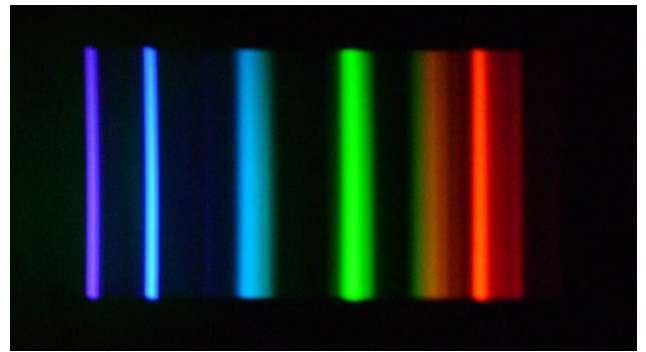


Рис. 3.1. Спектр ртутной кварцевой лампы



(а)



(б)

Рис. 3.2. Спектр лампы накаливания (а) и люминесцентной лампы (б)

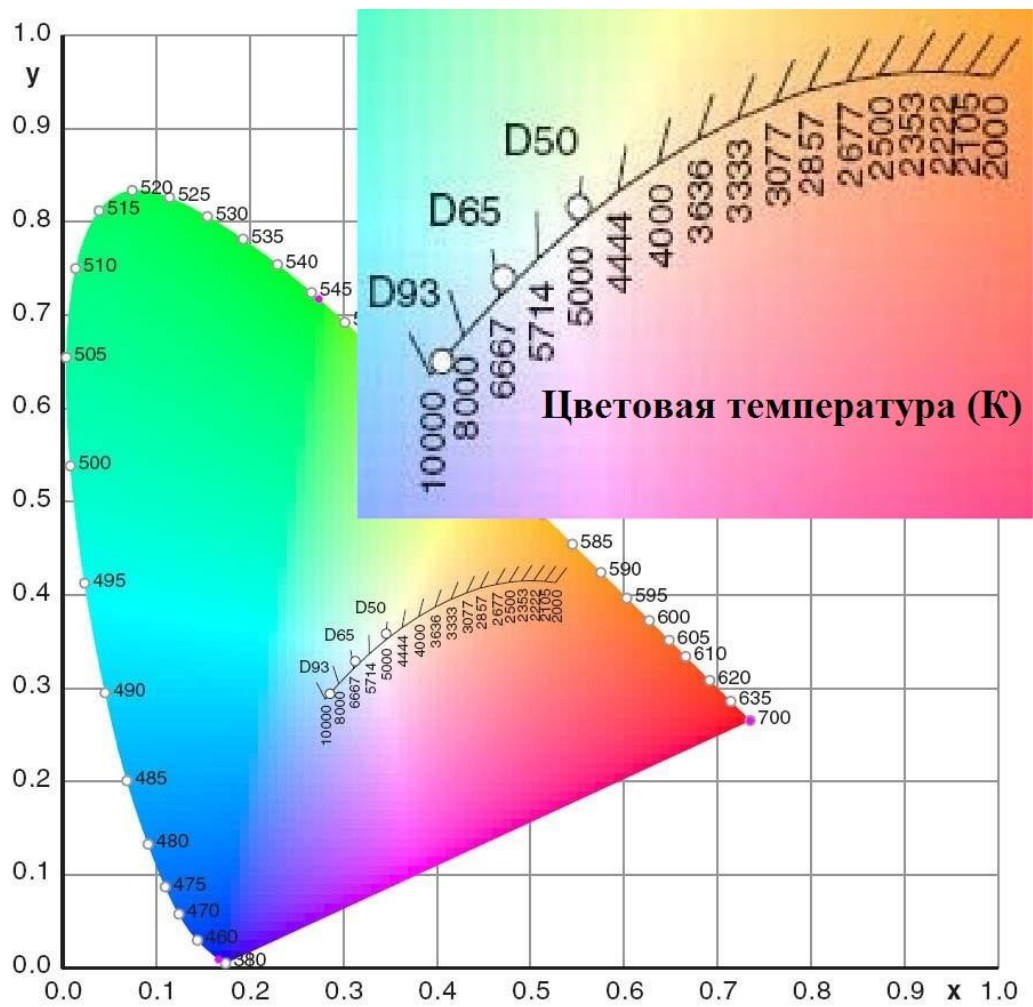


Рис. 3.3. Хроматическая диаграмма с длинами волн цветов и значениями цветковых температур

Другим параметром, связанным с освещением, является уровень освещенности, измеряемый в люксах (лк). С понижением освещенности матрица телекамеры теряет способность к распознаванию цвета и, в таком случае, передается информация только о интенсивности пикселей (рис. 3.5). При высоких значениях освещенности может происходить засвечивание полезной области изображения, и цветовая информация будет утеряна.

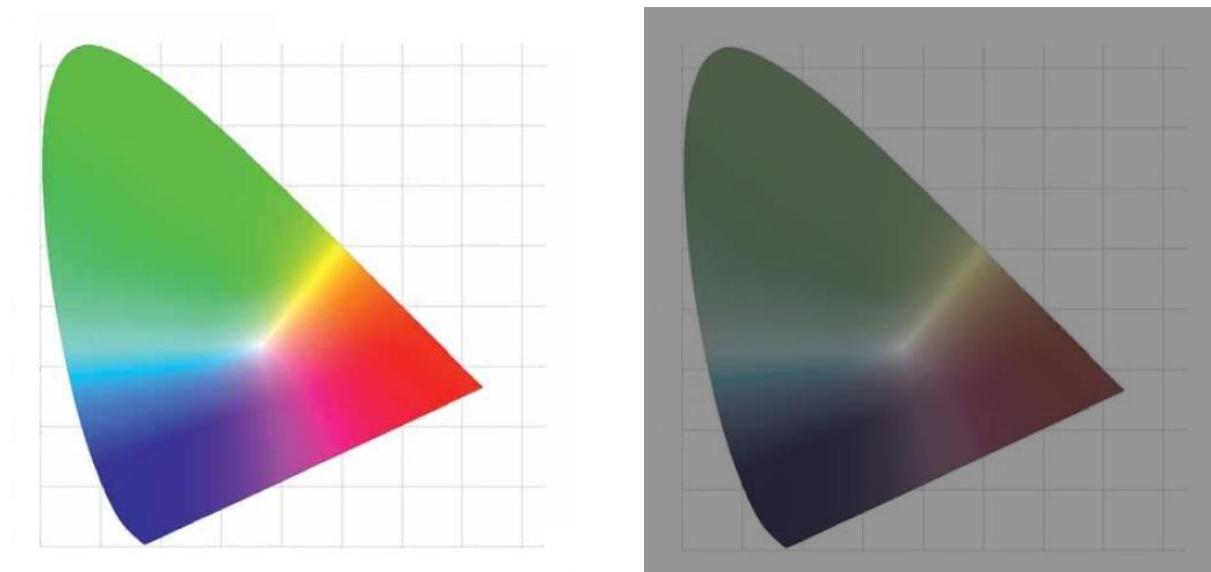


Рис. 3.5. Потеря цветности при имитации низкой освещенности на примере хроматической диаграммы

В связи с мобильностью МРП, которая предполагает использование данного алгоритма, ряд пространственных параметров системы необходимо исследовать. При перемещении МРП по помещению расстояние от камеры, установленной на самой МРП, до маяков может сильно варьироваться. Границей работоспособности в данном случае будет являться некоторая относительная площадь маяка на входном телевизионном изображении (рис. 3.6, а, б).

При движении, кроме расстояния «камер-маяк», может варьироваться угол, под которым маяк попадает в камеру, а, следовательно, и его относительная форма на изображении. Моделью такого движения может служить вращение маяка вдоль его вертикальной оси (рис. 3.6, в).

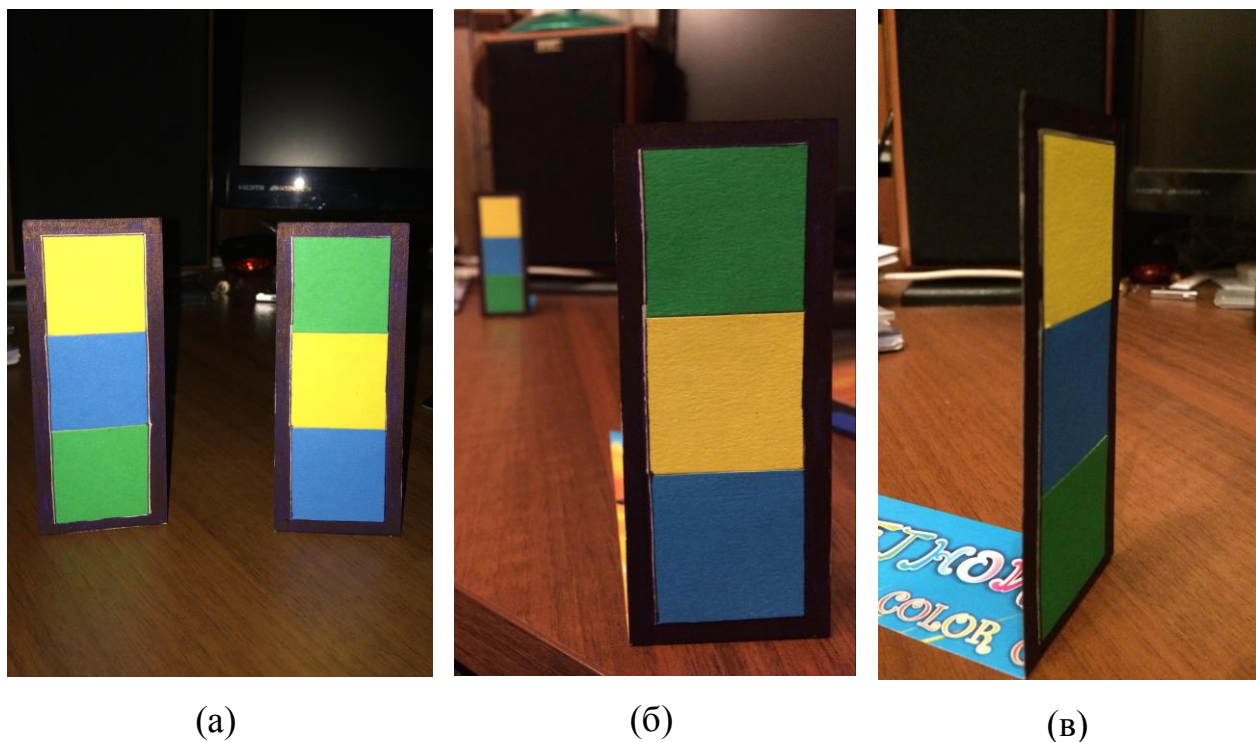


Рис. 3.6. Демонстрация искажений формы цветных областей маяков в кадре

Отличительной особенностью алгоритма распознавать маяк с цветовой кодировкой является их устойчивость к размытию изображения, вызванное быстрым перемещением маяка (или МРП). В отличие от QR-кодов, основанных на распознавании границ между черными и белыми областями двумерного штрих-кода, которые могут быть прочитаны только при неподвижном изображении, в алгоритме позиционирования «смазывание» не приведет к потере информации о цвете. Высокая скорость перемещения МРП может привести к искажению формы маяка, поэтому была проведена оценка граничной максимальной угловой скорости МРП.

Для задач позиционирования важна точность определения координат движущегося исследуемого объекта, поэтому было исследовано отклонение расчетных координат МРП от истинных значений. Данные исследования были проведены при нахождении в кадре телевизионного изображения двух и трёх маяков.

В ходе исследований была оценена производительность работы алгоритма, которая характеризовалась частотой кадров выходной видеопоследовательности.

В итог выше сказанному можно назвать перечень проведенных исследований:

1. Зависимость дисперсии относительных координат одного маяка от типа света, падающего на исследуемую сцену (прямые солнечные лучи, естественное освещение, лампа накаливания, люминесцентная лампа или ртутная кварцевая лампа).
2. Зависимость дисперсии относительных координат одного маяка от освещенности исследуемой сцены.
3. Зависимость дисперсии относительных координат одного маяка от угла поворота маяка вдоль его вертикальной оси.
4. Зависимость дисперсии относительных координат одного маяка от расстояния между видеокамерой и маяком.
5. Зависимость способности алгоритма распознать один маяк от угловой скорости движения маяка относительно оптической оси видеокамеры.
6. Исследование дисперсии абсолютных координат видеокамеры при распознавании двух маяков в различных сценах.
7. Определение зависимости величины дисперсии абсолютных координат видеокамеры от метода расчета координат при распознавании двух маяков.
8. Определение величины отклонения абсолютных координат видеокамеры от истинных значений и зависимость его от метода расчета координат при распознавании двух маяков.
9. Исследование дисперсии абсолютных координат видеокамеры при распознавании трех маяков в различных сценах.
10. Определение зависимости величины дисперсии абсолютных координат видеокамеры от метода расчета координат при распознавании трех маяков.

11. Определение величины отклонения абсолютных координат видеокамеры от истинных значений и зависимость его от метода расчета координат при распознавании трех маяков.
12. Зависимость дисперсии относительных координат одного маяка от уровня искусственно наложенного шума и от типа шума.
13. Определение зависимости величины дисперсии абсолютных координат видеокамеры от уровня искусственно наложенного шума и от типа шума при использовании метода аффинных преобразований.
14. Определение зависимости величины дисперсии абсолютных координат видеокамеры от уровня искусственно наложенного шума и от типа шума при использовании метода градиентного спуска.
15. Определение границ работоспособности алгоритма при наложении шума различной природы.
16. Определение производительности алгоритма при распознавании одного маяка в различных сценах.
17. Определение производительности алгоритма при распознавании двух маяков в различных сценах.
18. Определение производительности алгоритма при распознавании трех маяков в различных сценах.

3.2. Методы преобразования координат системы позиционирования при проведении исследований

Ошибка определения абсолютных координат складывается из ошибок определения относительных координат маяков и ошибок метода преобразования относительных координат в абсолютные. В работе рассматриваются два метода преобразования координат: метод аффинных преобразований и метод градиентного спуска.

Первый метод работает следующим образом:

1. Берутся два маяка на относительной карте.

2. Вычисляются расстояние между ними, расстояние от одного из маяков до телекамеры и угол между векторами, соединяющими маяк-маяк и маяк-камера.
3. Считается расстояние между этими маяками, но уже на абсолютной карте.
4. По этим данным производится сначала масштабирование, затем поворот для совмещения маяков на абсолютной карте.
5. В итоге аффинных преобразований (параллельный перенос, масштабирование и поворот), определяются абсолютные координаты телекамеры для данной комбинации двух маяков.
6. Операции с 1 по 5 повторяются для остальных всевозможных пар маяков.
7. Координаты камеры определяются как среднее арифметическое из всех координат, посчитанных выше.

Точность определения координат в методе градиентного спуска выбирается пользователем, в отличие от метода аффинных преобразований, где это невозможно. Метод градиентного спуска работает следующим образом:

1. Координаты распознанных маяков и телекамеры переносятся без изменений на абсолютную карту (камера при этом имеет координаты $(0, 0)$).
2. Производится параллельный перенос относительных координат на значения, равные координатам первого маяка (координаты первого маяка приобретают значение $(0, 0)$).
3. Производится параллельный перенос абсолютных координат на значения, равные координатам первого маяка (первый маяк из относительной системы координат совмещен с первым маяком из абсолютной системы в начале координат).
4. Относительные координаты поворачиваются на угол α , значение которого определяется методом градиентного спуска (по достижении

минимума среднеквадратичной ошибки между относительными и абсолютными координатами).

5. Производится масштабирование относительных координат с коэффициентом M , значение которого определяется методом градиентного спуска (по достижении минимума среднеквадратичной ошибки между относительными и абсолютными координатами).
6. На последнем этапе осуществляется параллельный перенос относительных координат телекамеры на значения, равные координатам первого маяка.
7. Камера находится в искомом месте на абсолютной карте, ее координаты можно снимать.

3.3. Анализ параметров освещения, влияющих на работу алгоритма распознавания

3.3.1. Изучение влияния типа освещения на работу алгоритма

В основе работы алгоритма распознавания лежит процедура, связанная с распознаванием цветowych областей маяка. Цвет области, на которую направлен объектив телекамеры, зависит не только от физических свойств отражающей поверхности, но и от спектрального состава падающего света. Поэтому в первую очередь было исследовано качество работы алгоритма в зависимости от типа внешнего освещения.

В исследовании использовался один маяк. На точность определения относительных координат влияет точность определения геометрического центра маяка C на входном телевизионном изображении, который определяется в пикселях (рис. 3.7). Поэтому в качестве показателя качества для большинства исследований была выбрана дисперсия координат геометрического центра маяка, измеряемая в пиксель² (пикс.²). К тому же дисперсия центра маяка является фактором, искажающим форму маяка, и при высоких значениях этого параметра может привести к тому, что маяк

будет отбракован системой за счет сильного искажения его формы и не соответствия заданным условиям.

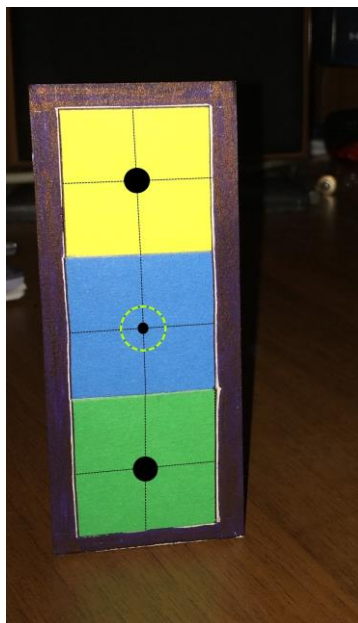


Рис. 3.7. Геометрический центр маяка С

При этом маяк устанавливался неподвижно перед камерой на время всего эксперимента. В идеальном случае дисперсия должна быть равна нулю, но из-за наличия шума на изображении координаты геометрического центра маяка носят случайный характер [31].

Маяк устанавливался на расстоянии 1 м от телекамеры, и рабочая сцена последовательно освещалась пятью различными источниками света, которые имели, соответственно, различный спектральный состав излучения. В опыте использовались: прямые солнечные лучи, естественное освещение в облачную погоду, лампа накаливания, люминесцентная лампа холодного белого цвета и ртутная кварцевая лампа. Длительность эксперимента составляла 180 с, что при частоте кадров на выходе алгоритма в 24,4 кадр/с давало приблизительно 4400 измерений для каждого типа освещения.

Зависимость дисперсии геометрического центра одного маяка от типа освещения показана на рис. 3.8.

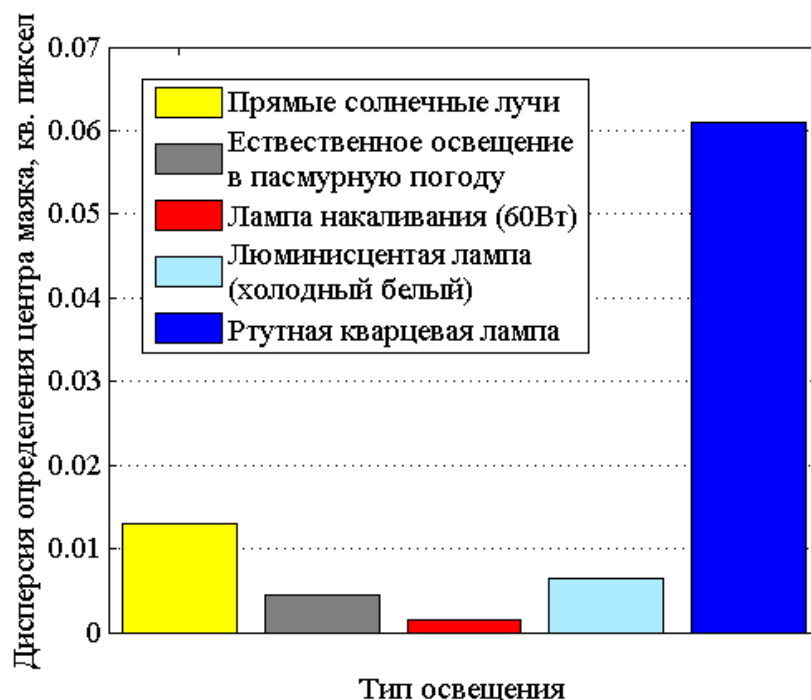


Рис. 3.8. Зависимость дисперсии относительных координат центра маяка от типа освещения

По результатам опыта видно, что худшие результаты получились при использовании ртутной кварцевой лампы (дисперсия – 0,061 пикс.²). Это можно объяснить ограниченностью спектрального состава света. Их спектральный состав в отличие от естественного освещения и ламп накаливания (которые имеют непрерывный спектр в видимой области) является линейчатым (дискретным). Это хорошо видно на рисунках 3.1 и 3.2.

Наилучшие результаты дали лампа накаливания (дисперсия – 0,0015 пикс.²) и естественное освещение в пасмурную погоду (дисперсия – 0,0045 пикс.²). Эти источники света дают равномерную освещенность и широкий спектр излучаемого света, что дает высокие значения насыщенности цветов. Но для всех источников света значения дисперсии относительных координат центра маяка не велики, и алгоритм в каждом случае сохранял свою работоспособность.

Также было определено влияния различных типов освещения на уровни верных распознаваний маяка (табл. 3.1). Для этого было проведено по 5 опытов для каждого типа освещения. Для проведения одного опыта

записывалась видеопоследовательность длительностью 60 секунд, на которой присутствовал маяк.

Таблица 3.1. Зависимость уровня распознавания маяка при измерении типа освещения

Тип освещения	Прямые солнечные лучи	Естественное освещение	Лампа накаливания	Люминесцент. лампа	Ртутная лампа
Уровень распознавания	93%	97%	98%	98%	98%

3.3.2. Изучение влияния освещенности на работу алгоритма

Еще одним внешним параметром, характеризующим исследуемую сцену, является освещенность, измеряемая в люкс (лк). При низких значениях освещенности матрица телекамеры не способна распознать цвета и переходит в режим оттенков серого. В данном режиме передается информация только о интенсивности пикселей, но не о цвете. Наоборот, при очень высоких значениях освещенности, изображение может получиться засвеченным, и цветовая информация будет утеряна [67].

В эксперименте, как и в предыдущем исследовании, использовался один маяк и показателем качества также была выбрана дисперсия относительных координат геометрического центра маяка, которая измеряется в пикс.². При этом маяк устанавливался неподвижно перед камерой на время всего эксперимента на расстоянии 1 м.

В плоскости с маяком устанавливался датчик измерения освещенности (люксметр), который был подключен к мультиметру (DT-21) с соответствующей функцией. Для освещения сцены использовалось комнатное освещение с одной лампой накаливания мощностью 60Вт, подключенной в электрическую цепь через диммер (регулятор мощности). Освещаемая сцена располагалась в 3 м от лампы накаливания (рис. 3.9).

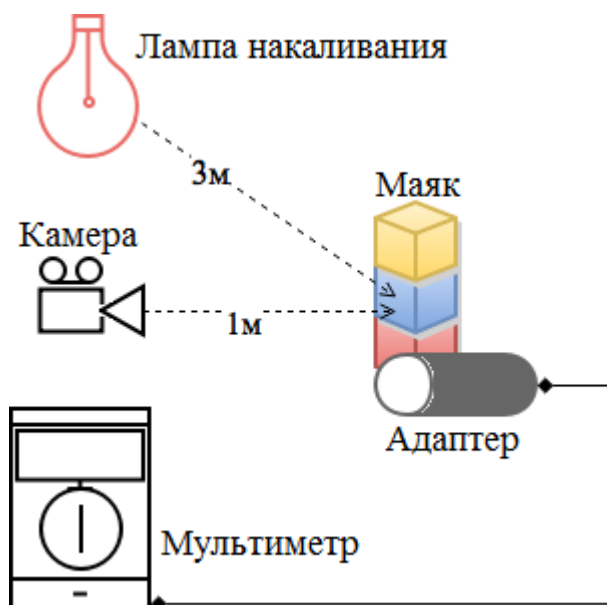


Рис. 3.9. Схема проведения эксперимента по влиянию освещенности

При максимальной мощности, выставленной на диммере, мультиметр показывал 52 лк освещенности. Затем мощность диммера постепенно понижалась и таким образом, чтобы освещенность сцены с каждым шагом падала на 3 лк (минимально возможное для используемого типа диммера). Для каждого значения освещенности снимались значения относительных координат центра маяка в течении 1 мин. С учетом частоты кадров выходной с алгоритма распознавания видеопоследовательности (24,4 кадр/с) для каждого значения освещенности были проведены по 1500 измерений и рассчитаны дисперсии координат. График построенный по полученным результатам (рис. 3.10) демонстрирует зависимость дисперсии относительных координат одного маяка от освещенности исследуемой сцены. Из графика видно, что с понижением освещенности дисперсия координат возрастает, при освещенности порядка 22 лк алгоритм работает нестабильно и на следующем шаге (19 лк) работоспособность была утеряна, система не смогла обнаружить центр маяка.

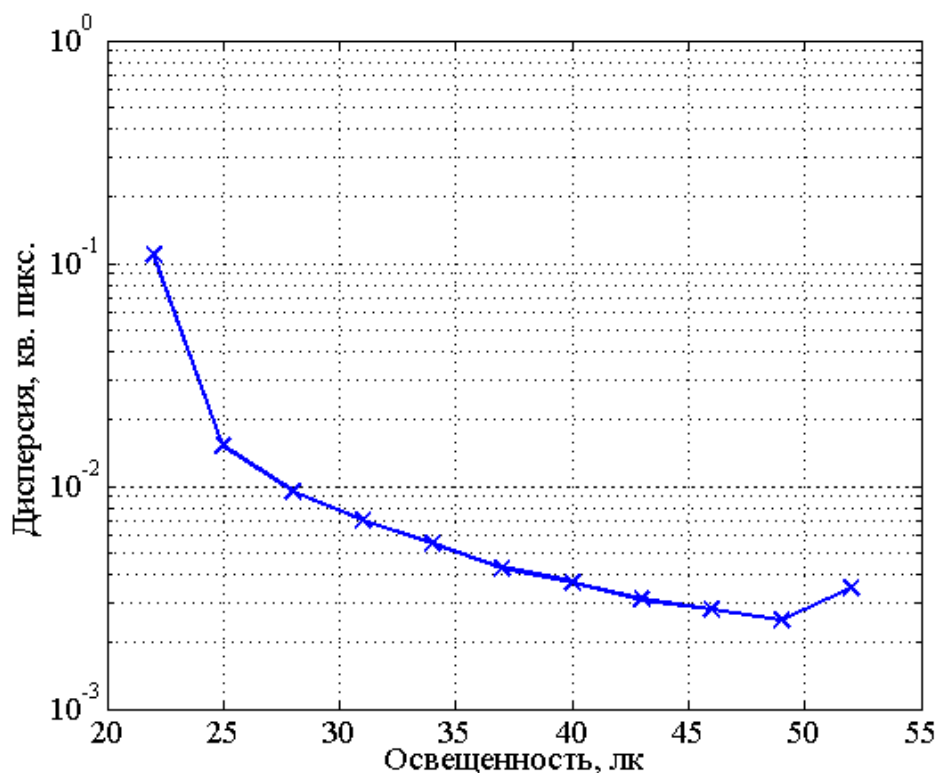


Рис. 3.10. Зависимость дисперсии координат маяка от освещенности

Если данные результаты представить в виде таблицы (табл. 3.2), то можно сделать вывод, что порогом, выраженным через параметр дисперсии определения относительных координат центра маяка, при распознавании является значение 0,11 пикс.². Также в данной таблице приведены значения оценки уровня верных распознаваний маяка при изменении освещенности сцены.

Таблица 3.2. Зависимость дисперсии координат маяка от освещенности

Освещенность, лк	22	25	28	31	34	37	40	43	46	49	52
Дисперсия, пикс. ²	0,109	0,015	0,01	0,007	0,006	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,004
Уровень распознавания, %	27	78	100	96	98	97	98	100	94	97	100

Для определения причины потери работоспособности алгоритма при данном уровне освещенности были сделаны следующие предположения: во-первых, причиной могли стать высокая дисперсия расчетных координат

центра маяка (наблюдается резкий скачок с уменьшением уровня освещенности), приводящая к искажению формы маяка, во-вторых, с понижением освещенности сцены телекамера постепенно теряла информацию о цвете [25].

В первом предположении дисперсия приводит к тому, что угол между вектором, соединяющим верхнюю цветовую область маяка и центральную (геометрический центр маяка), и вектором между центральной и нижней областями превышает допустимый порог в 7° (рис. 2.22). Проведем расчет: учитывая, что высота маяка, используемая в экспериментах $h = 34$ мм, то при пороговом смещении в 7° центр одной из областей должен быть смещен на 2,1 мм. А зная из эксперимента дисперсию в $0,11$ пиксель² – среднее квадратичное отклонение получается приблизительно $1/3$ пиксель. При таком отклонении, чтобы быть отбракованным по углу в 7° между векторами «скелета» маяка, необходимо, чтобы сам маяк занимал по высоте на телевизионном изображении не более 5,43 пиксель. Зная это, по формуле (2.12) можно оценить расстояние камера-маяк для данных условий:

$$d = \frac{R/2}{\operatorname{tg}(\psi/2)} \cdot \frac{h}{h_{\text{pix}}} = \frac{640\text{px}/2}{\operatorname{tg}(33,27^\circ/2)} \cdot \frac{0,034\text{м}}{5,43\text{px}} \approx 67\text{м}$$

Учитывая, что эксперимент проводился при расстоянии между камерой и маяком равным 1 метр, первая гипотеза является не верной. Само возрастание дисперсии связано с тем, что при понижении уровня освещенности сцены телекамера увеличивает светочувствительность (за счет изменения параметров передаточной функции телекамеры), которая и приводит к понижению отношения сигнал/шум на выходном телевизионном изображении, так называемому «цифровому шуму» [56]. К тому же в алгоритме распознавания введена важная фильтрация по размеру цветовой области маяка: если её площадь менее 100 пикс. (10x10 пикс.), то маяк отбраковывается, как сторонняя, не принадлежащая маяку область.

Следовательно, причиной потери работоспособности стоит считать потерю телекамерой информации о цвете из-за недостаточной

освещенности. В этом случае, при понижении уровня освещенности, происходит изменение значения канала Value (яркость) и, незначительно, Saturation (насыщенность) цветовой модели HSV на входе алгоритма. Их значения выходят за пороговые, определяемые логистическим сигмоидом, и в этот момент маяк отбраковывается.

Для утверждения данной гипотезы был проведен эксперимент определяющий зависимость значений каждого из каналов цветowego пространства HSV от уровня освещенности. Для этого был поставлен эксперимент схожий с предыдущим. На расстоянии 1 метр устанавливалась камера от маяка, сам маяк располагался в 3 метрах от источника освещения. Эксперимент проводился следующим образом: в начале на диммере был выставлен максимальный уровень мощности, при котором мультиметр с адаптером уровня освещенности, как и предыдущем опыте, отображал освещенность на уровне 52 лк. Мощность диммера также постепенно понижалась с шагом в 3 лк (минимально возможное для данного типа диммера). В это время в кадре телевизионного изображения был размещен маяк с цветовыми областями: желтого, красного и зеленого цветов (рис. 3.7).

Для каждого уровня освещенности снимались значения для трех каналов: Hue (оттенок), Saturation (насыщенность), Value (яркость).

На рис. 3.11 приведены графики изменения значений каналов HSV при изменении уровня освещенности сцены, из которых можно сделать вывод о том, что при понижении освещенности быстрее всего падает значение яркости, а значение оттенка остается практически без изменений. Также изменения претерпевает канал насыщенности. Отсюда можно сделать вывод, что алгоритм теряет свою работоспособность, когда значение яркости или насыщенности преодолевает порог задаваемый логистическим сигмоидом (рис. 2.21) в системе.

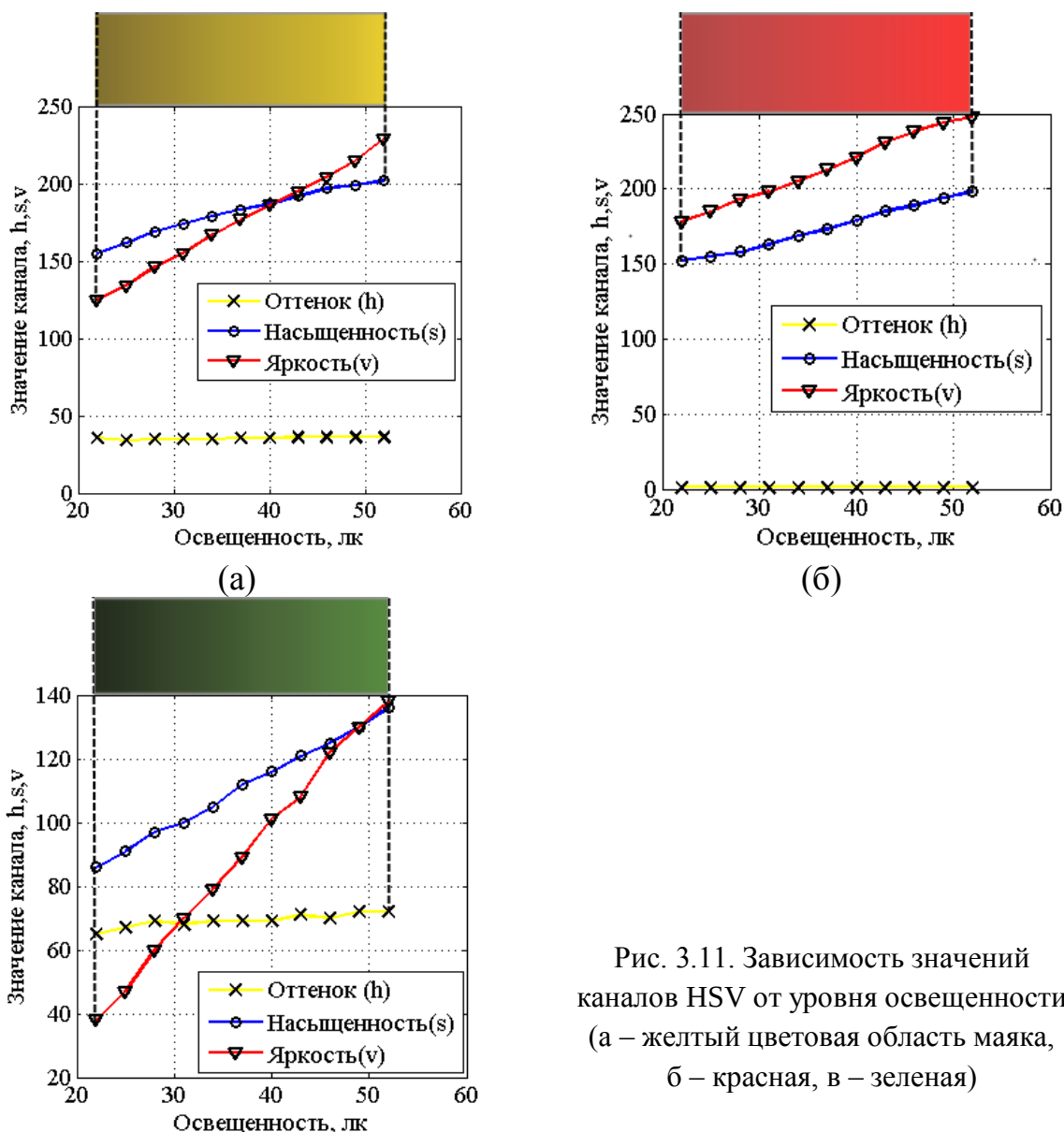


Рис. 3.11. Зависимость значений каналов HSV от уровня освещенности
(а – желтый цветовой область маяка, б – красная, в – зеленая)

3.4. Анализ пространственных параметров, влияющих на работу алгоритма распознавания

3.4.1. Изучение влияния угла поворота маяка на работу алгоритма

На практике при использовании маяков, нанесенных на подвижные или неподвижные объекты, возможна ситуация, когда маяк пропадет из вида телекамеры, так как она устанавливается на МРП. Моделью такого движения может служить вращение маяка вдоль его вертикальной оси [30].

Для проведения данного эксперимента маяк устанавливался под углом относительно телекамеры и для каждого значения поворота снимались данные в течении 1 минуты о расчетных относительных координатах

геометрического центра маяка. Угол поворота изменялся с шагом в 5° . Для данного эксперимента маяк устанавливался на расстоянии 1 метра от камеры. Как и в предыдущих опытах, при обработке алгоритмом распознавания одного маяка, находящегося на телевизионном изображении, частота кадров на выходе алгоритма составляет 24,4 кадр/с (частота входной видеопоследовательности 30 кадр/с). Число измерений для каждого угла составляет 1500.

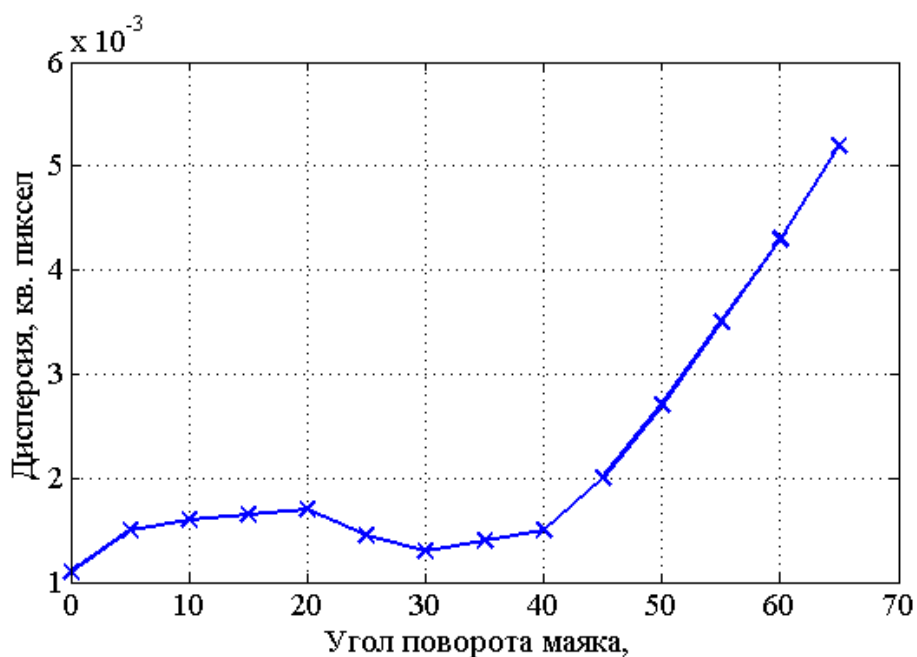


Рис. 3.12. Зависимость дисперсии координат маяка от угла поворота

Зависимость дисперсии координат одного маяка от угла поворота маяка вдоль его вертикальной оси показана на рис. 3.12.

Из графика видно, что наилучшая ситуация, когда плоскость маяка перпендикулярна оптической оси объектива телекамеры. В этом случае относительная площадь цветowych областей максимальна. При значении угла больше 40° дисперсия резко возрастает, но при углах, превышающих 65° , алгоритм не способен распознать маяк. Стоит отметить, что значения дисперсии не так высоки и не приводят к достаточному искажению «скелета» маяка для его отсеивания алгоритмом.

Также был оценен уровень верного распознавания при различных углах поворота маяка (табл. 3.3). Для этого было проведено по 5 опытов для каждого угла поворота в различных условиях. Для проведения одного опыта записывалась видеопоследовательность длительностью 60 секунд, на которой присутствовал маяк. Полученные результаты распознавания приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Зависимость уровня распознавания маяка от угла его поворота

Угол, градус	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Уровень распознавания, %	97	98	96	98	98	96	76	94	97	98	96	97	98	91

Из табл. 3.3 видно, что угол поворота не влияет на уровень распознавания маяка.

В связи с полученными результатами, сделан вывод, что причиной потери работоспособности может являться уменьшение относительной площади маяка на телевизионном изображении. В таком случае, возрастание дисперсии с расстоянием будет связано с наличием собственных шумов телекамеры (фотосенсоров матрицы), которые имеют постоянное среднее значение и, при уменьшении относительного размера маяка на изображении, будут вносить больший вклад в ошибку распознавания.

Теоретически распознавание маяка будет прекращаться, когда его относительная площадь на телевизионном изображении будет меньше некоторого априорно заданного порога. Данным порогом была установлена площадь цветовой области в 100 пикселей. Учитывая, что цветные области имеют квадратную форму, минимально возможная сторона цветовой области – 10 пикселей, а реальный размер стороны цветовой области – 15мм.

Из формулы (2.12) можем определить относительный размер цветовой области на телевизионном изображении в пиксельной системе координат на расстоянии 1 метр от камеры:

$$h_{\text{цв.обл. pix}} = \frac{R/2}{\operatorname{tg}(\psi/2)} \cdot \frac{h_{\text{цв.обл.}}}{d} \approx 16 \text{ пикселей}$$

где $h_{\text{цв.обл.}}$ - реальное значение стороны цветовой области.

При повороте маяка вокруг вертикальной оси горизонтальная проекция маяка (в частности отдельных цветowych областей) на матрицу телекамеры будет уменьшаться в соответствии с законом:

$$H_{\text{цв.обл. pix}} = h_{\text{цв.обл. pix}} \cos(\alpha)$$

где $H_{\text{цв.обл. pix}}$ - проекция цветовой области на матрицу телекамеры; α - угол между плоскостью маяка, в которой расположена цветовая область и плоскостью телекамеры, в которой расположена матрица камеры (рис. 3.13).

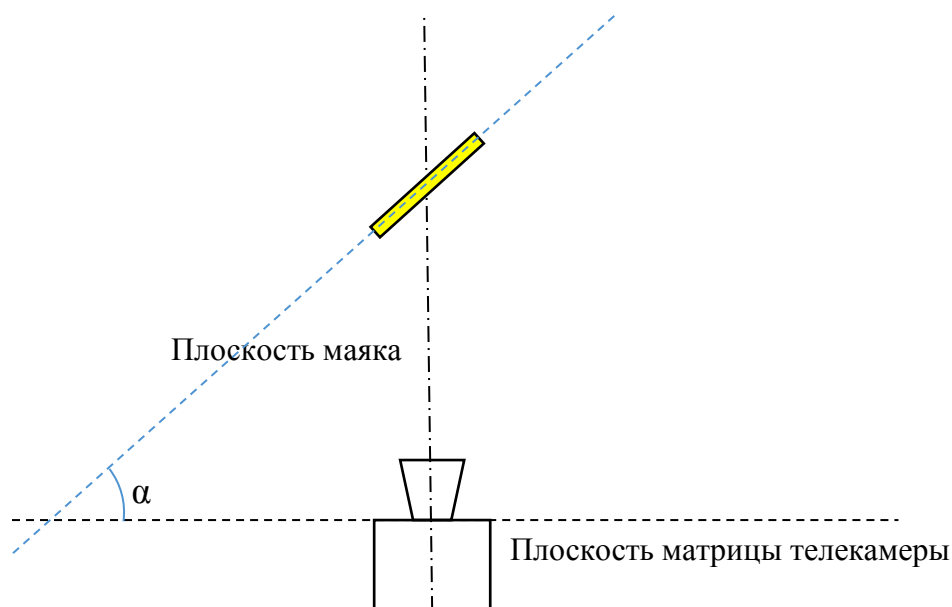


Рис. 3.13. Схема поворота маяка

Для того, чтобы отстаиваться в пределах порога минимально допустимой площади цветовой области в 100 пикс., учитывая независимое от угла поворота маяка постоянное значение относительной высоты цветовой области (16 пикс.), минимальное значение ширины проекции цветовой области (по горизонтали) на матрицу камеры – 6,25 пикселей. Таким образом, для расстояния в один метр можем оценить максимальный угол поворота маяка:

$$\cos(\alpha) = \frac{H_{\text{цв.обл. pix}}}{h_{\text{цв.обл. pix}}}, \quad \alpha = \arccos\left(\frac{H_{\text{цв.обл. pix}}}{h_{\text{цв.обл. pix}}}\right) = \arccos\left(\frac{6,25}{16}\right)$$

Полученный результат в радианах умножим на $\frac{180^\circ}{\pi}$, и получим $\alpha = 67^\circ$.

Полученное расчетное значение граничного угла работоспособности полностью соответствует результатам проведенного эксперимента. В эксперименте использовались маяки с цветовой схемой, нанесенной на плоскость. Данная форма дает преимущество в случае, когда системе важно определить ориентацию маяка в пространстве. Для системы позиционирования достаточно распознать маяк, и использовать его априорно заданные координаты для определения местоположения того объекта, на котором расположена камера и функционирует данная система. Поэтому, чтобы избежать ограничения по углу обзора маяка, для повышения надежности распознавания могут быть использованы цилиндрические маяки или маяки с выпуклой поверхностью.

3.4.2. Изучение влияния расстояния между маяком и камерой на работу алгоритма

В связи с тем, что МРП, на которой планируется использовать алгоритм позиционирования, активно перемещается по помещению, расстояние от камеры до маяков может сильно варьироваться. Данный фактор является очень важным, так как при увеличении расстояния будет уменьшаться относительная площадь маяка, которую он занимает на изображении. В системе было введено ограничение: если площадь какой-либо цветовой области становится меньше, чем 100 пикселей, то она классифицируется, как сторонний объект, не принадлежащий маяку, и далее не участвует в распознавании.

Таким образом, такой параметр работоспособности алгоритма, как максимальное расстояние до маяка, является относительным. Он зависит от размеров маяка (его высоты). В опыте использовались маяки высотой 34 мм.

Стоит напомнить, что высотой маяка является расстояние между центрами его цветковых областей.

Для определения абсолютной величины, нужно поделить минимальную площадь маяка, который все еще будет распознаваться, на общую площадь изображения. Минимальная относительная площадь маяка равна 300 пикселей (маяк состоит из трех цветковых областей). Общая площадь изображения составляет $640 \cdot 480 = 307200$ пикселей. Таким образом, если маяк занимает $300 : 307200 = 1 : 1024$ часть изображения, то он будет распознан.

Для проведения теоретической оценки максимального расстояния, необходимо, чтобы площадь маяка на телевизионном изображении, при его реальной высоте равной 34 мм, была не менее 300 пикс. Для этого снова обращаемся к формуле (2.12). Учитывая, что цветковые области имеют квадратную форму, сторона такой области должна быть не менее 10 пикселей, поэтому минимальная высота маяка (расстояние между двумя крайними цветковыми областями) на входном изображении будет равна 20 пикселей (промежуточными расстояниями между областями пренебрегаем из-за их малых размеров)

$$d = \frac{R/2}{\operatorname{tg}(\psi/2)} \cdot \frac{h}{h_{\text{pix}}} = \frac{640\text{px}/2}{\operatorname{tg}(33,27^\circ/2)} \cdot \frac{0,034\text{м}}{20\text{px}} = 1,81\text{м}$$

Для проверки проведенных теоретических расчетов был проведен эксперимент, при котором маяк в начале устанавливался в 10 см от камеры и, затем, отдалялся с шагом 10 см. Для каждого расстояния снимались расчетные относительные координаты центра маяка, для которых была посчитана дисперсия. По результатам эксперимента был построен график зависимости дисперсии координат одного маяка от расстояния между телекамерой и маяком (рис. 3.14).

Из графика видно, что реальные результаты согласуются с теоретическими и при расстоянии свыше 1,7 м алгоритм не способен распознать маяк. Это свидетельствует о уменьшении его относительного

размера на телевизионном изображении ниже порогового значения. Следовательно, высоту маяка нужно выбирать из расчета характерных расстояний, используемых в поставленной задаче.

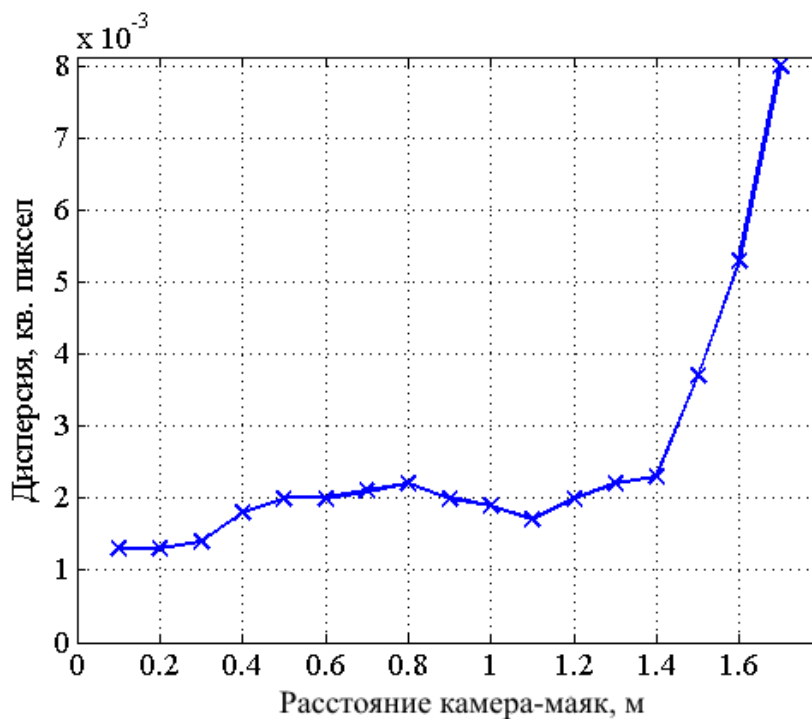


Рис. 3.14. Зависимость дисперсии координат маяка от расстояния маяк-камера

Также был оценен уровень верного распознавания маяка при различных расстояниях «камера-маяк» (табл. 3.4). Для этого проведено по 5 опытов при различных условиях для каждого расстояния. В каждом опыте записывалась видеопоследовательность длительностью 60 секунд.

Таблица 3.4. Зависимость уровня распознавания маяка расстояния «камера-маяк»

Расстояние, см	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Уровень распознавания, %	100%	100%	98%	99%	97%	98%	100%	97%	95%	97%

Расстояние, м	110	120	130	140	150	160	170
Уровень распознавания, %	99%	93%	87%	92%	97%	96%	80%

Для того, чтобы определить максимальные расстояния работы алгоритма для различных размеров маяков была проведена теоретическая оценка данной зависимости. Из формулы (2.12), минимальная относительная высота маяка остается неизменной – 20 пикс, а реальный размер маяка (высота) был взят в диапазоне от 3 см до 1 метра, с шагом 1 см (рис. 3.15).

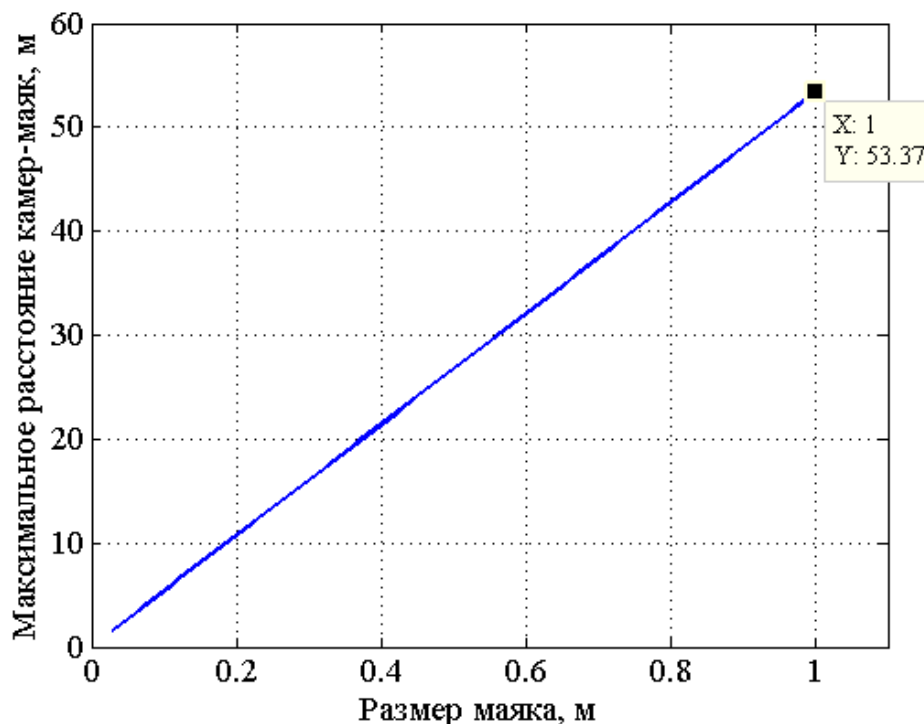


Рис. 3.15. Зависимость максимального расстояния для распознавания маяка системой от размера маяка

Все данные расчеты проводятся для разрешения 640x480, и это сильно ограничивает возможности системы. Поэтому проведение исследования по оценке максимально возможных расстояний между телекамерой и маяком в зависимости от разрешения телекамеры позволит оценить реальные масштабы по возможностям разработанной системы позиционирования.

Используя формулу:

$$d = \frac{R/2}{\operatorname{tg}(\psi/2)} \cdot \frac{h}{h_{\text{pix}}},$$

где угол обзора объектива телекамеры $\psi = 33,38^\circ$ (оставлен без изменения, но важно понимать, что для каждой камеры данное значение будет индивидуальным, а для современной техники, может быть значительно выше), минимальная высота маяка на входном кадре $h_{pix} = 20$ пикс., реальная высота маяка $h = 0.3$ м (подходящий размер, с точки зрения удобства, для работы на больших пространствах), получаем график зависимости максимально возможного расстояния камера-маяк от разрешения камеры R , значения которого по горизонтали взяты в диапазоне $320 \div 1920$ пиксель с шагом 10 пикс. (рис. 3.16).

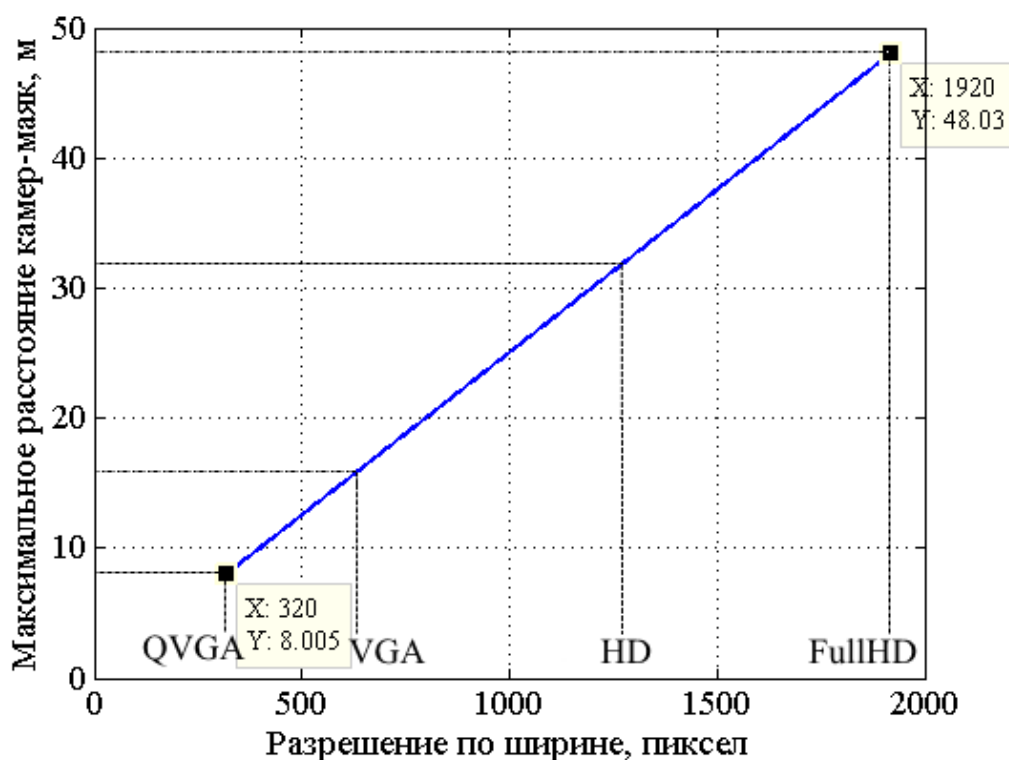


Рис. 3.16. Зависимость максимально возможного расстояния камера-маяк от разрешения камеры

Из графика видно, что возможные масштабы системы быстро возрастают, и при использовании камеры с разрешением FullHD (1920x1080) при высоте маяка в 30 см максимальное расстояние возрастает до 48 м.

3.4.3. Изучение влияния скорости движения маяка на работу алгоритма

Отличительной особенностью алгоритма распознавания маяков с цветовой кодировкой является их устойчивость к размытию изображения, вызванное быстрым перемещением маяка (или МРП). При «смазывании» маяка с цветовой кодировкой информация о цвете не теряется, что позволяет распознать маяк. Например, QR-код, основанный на распознавании границ между черными и белыми областями двумерного штрих-кода, читается только при неподвижном изображении.

Необходимо также отметить, что степень «смазывания» изображения зависит от внешней освещенности и частоты следования кадров. Опыт проводился при освещенности 52 лк.

Линейная скорость движения маяка не является универсальной величиной для опыта, так как эффект «смазывания» будет проявляться в разной степени, в зависимости от расстояния маяк-камера. Поэтому в качестве параметра была выбрана угловая скорость движения маяка относительно оптической оси объектива. Телекамера является центром вращения. Для проведения опыта она устанавливалась на сервопривод, которая поворачивалась на 180° с различной угловой скоростью. Исследование было проведено для различных угловых скоростей, которая менялась с шагом в 5 градус/с по 5 экспериментов для каждой скорости в различных условиях. Один эксперимент включал в себя 10 опытов (10 прохождений маяка по изображению с заданной угловой скоростью).

Уровень верного распознавания маяка в зависимости от угловой скорости его движения показана в табл. 3.5. По результатам установлено, что при скоростях больше 25 °/с распознавание происходит не стабильно. При скоростях свыше 35 °/с алгоритм не способен распознать маяк. Данный порог надежности в 25 °/с по угловой скорости является подходящим с точки зрения автономной работы МРП и выполнения простых вспомогательных задач, например, автономного перемещения товаров на складе за счет ориентации по цветовым маякам или автономного передвижения по зданию с

маломобильным пассажиром на борту транспортного средства оборудованной системой позиционирования. В подобных задачах не требуется высокая скорость работы, и угловая скорость в 25 °/с, которая в основном имеет место при развороте МРП является приемлемой.

Табл. 3.5. Уровень распознавания при различных угловых скоростях движения маяка

Угловая скорость, градус/с	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Уровень распознавания, %	100%	98%	100%	98%	96%	92%	78%	88%	20%	0%	0%

3.5. Анализ работы алгоритма позиционирования при распознавании двух и трёх маяков на входном телевизионном изображении

3.5.1. Исследование работы алгоритма позиционирования по двум маякам при различных методах преобразования координат

Выходными параметрами алгоритма согласно блок-схеме, на рис. 2.15, являются абсолютные координаты телекамеры, определяющие собой местоположение МРП в пространстве. Поэтому определение точности измерения этих координат является основной и самой важной частью исследования.

За основной параметр стабильности работы алгоритма приняты отклонение и дисперсия абсолютных координат камеры, а за параметр точности – отклонение результатов измерений от истинных значений, измеренных вручную [30]. Истинные координаты телекамеры определены с точностью до 0,5 мм.

Было проведено пять опытов в различных условиях, в каждом из которых два маяка высотой 34 мм расставлялись в пространстве по-разному (в пределах порога работоспособности для данного размера маяка и разрешения 640x480 – не более 1,8м между камерой и маяком), т.е. с различными результирующими координатами телекамеры. В каждом из опытов в память компьютера записывалась видеопоследовательность

длительностью 160 с, на которой присутствовали упомянутые выше маяки. При этом изображение было статичным (маяки и телекамера оставались неподвижными), а освещенность сцены – постоянной. Учитывая оценочную частоту кадров – 13,5 кадр/с, для каждого опыта проведено порядка 2160 измерений.

Данная видеопоследовательность подавалась на вход алгоритма. При этом абсолютные координаты вычислялись двумя методами: методом аффинных преобразований и методом градиентного спуска. Результаты одного из опытов приведены на рис. 3.18.

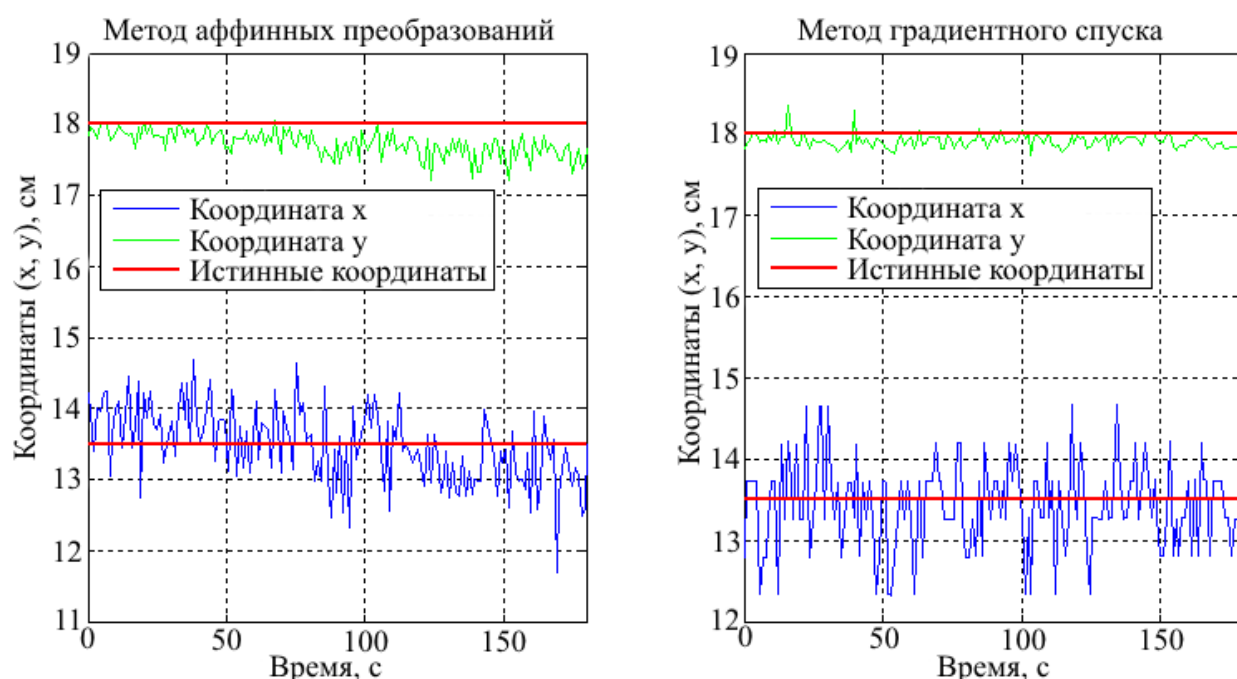


Рис. 3.18. Определение абсолютных координат камеры при использовании двух маяков

По результатам пяти опытов построена гистограмма дисперсий абсолютных координат телекамеры, посчитанных с использованием различных методов преобразования (рис. 3.19).

Из гистограммы видно, что в различных опытах дисперсии абсолютных координат получились различными. При сравнении двух методов определения координат нельзя однозначно выделить лучший. Метод аффинных преобразований показал лучшие результаты в четвертом и пятом

опытах (в двух случаях из пяти), а метод градиентного спуска – в первом, втором и третьем опытах (в трех случаях из пяти).

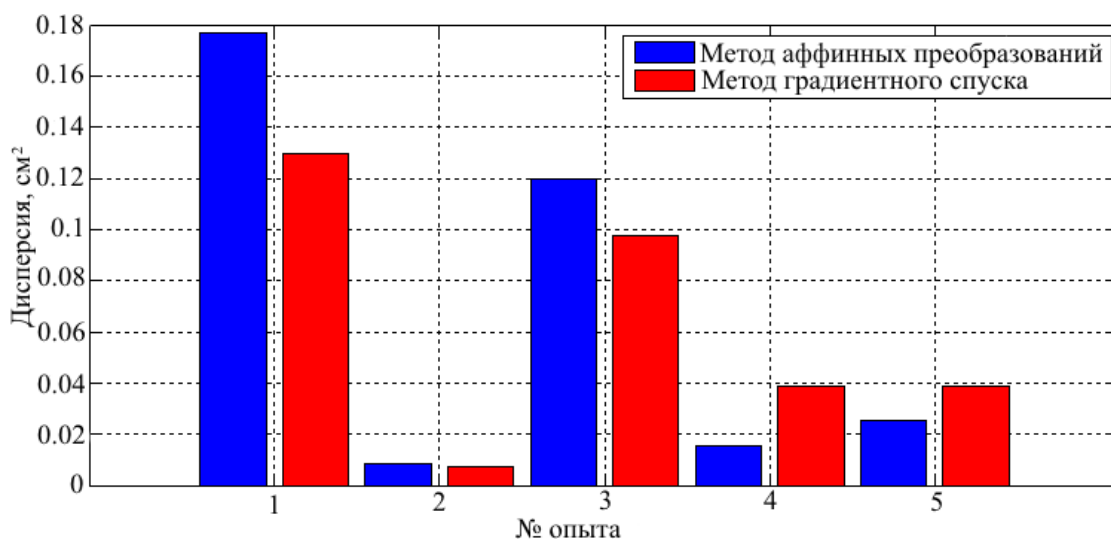


Рис. 3.19. Зависимость дисперсии координат камеры от метода преобразования координат при использовании двух маяков

Также построена гистограмма отклонений абсолютных координат телекамеры от истинных значений с учетом метода определения координат (рис. 3.20). Из полученных результатов видно, что в различных опытах отклонения абсолютных координат получились различными. Отклонение абсолютных координат камеры от истинных при нахождении двух маяков в кадре при использовании метода аффинных преобразований составляет $4,2 \pm 0,7$ мм. Для метода градиентного спуска – $6,1 \pm 1,0$ мм. Метод аффинных преобразований показал заметно лучший средний результат, хотя в 1 и 3 опыте уступил методу градиентного спуска. На рис. 3.21 показана гистограмма распределения отклонений для каждой расчетной координаты при двух метода преобразования, построенная по всем проведенным экспериментам.

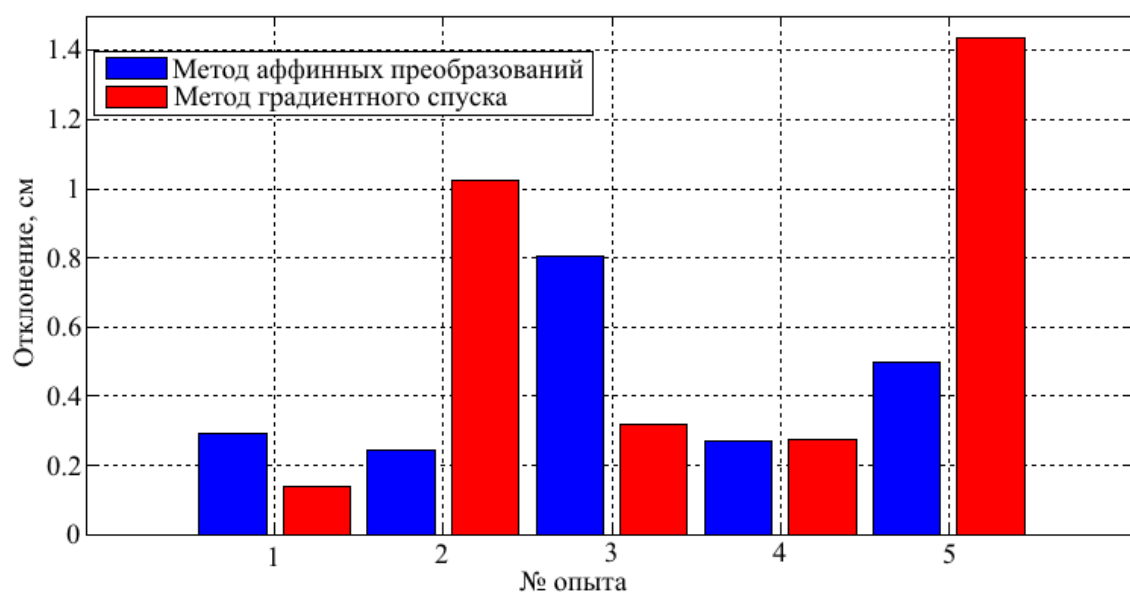


Рис. 3.20. Отклонение координат камеры от истинных значений при использовании двух маяков

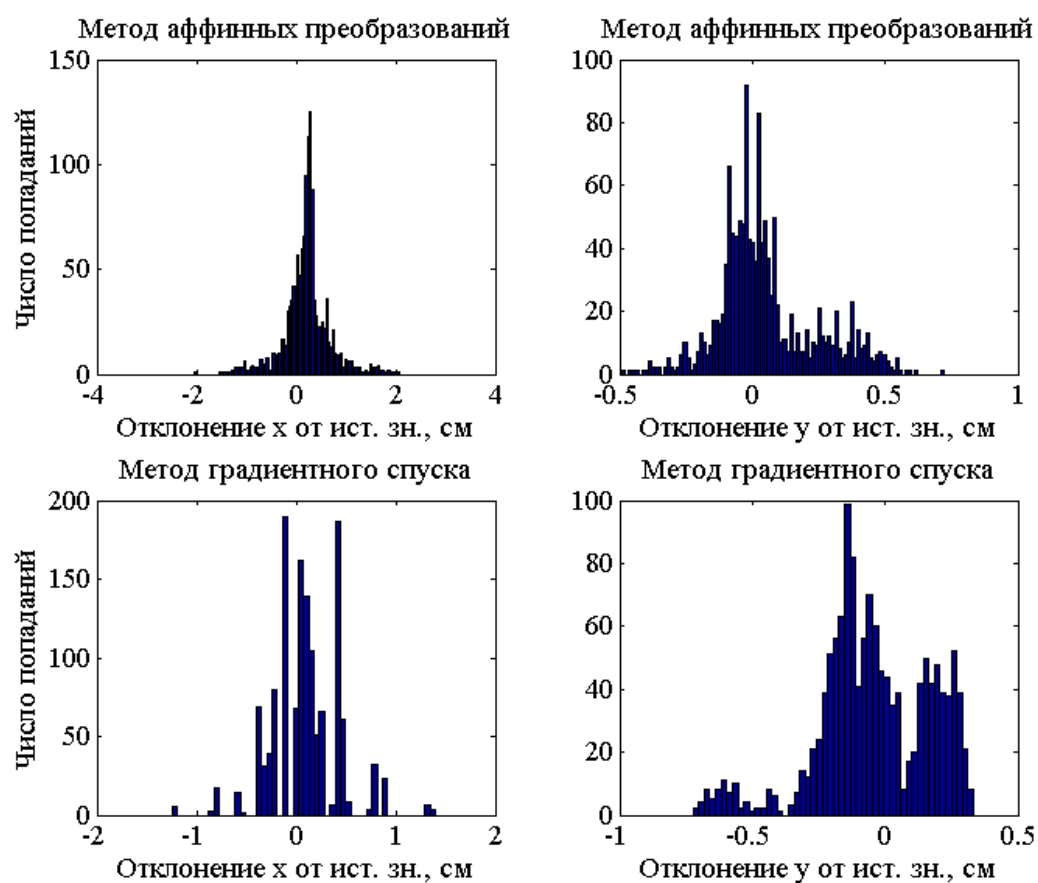


Рис. 3.21. Гистограмма распределения отклонений расчётных координат для 2-х маяков, построенная по всем опытам

3.5.2. Исследование работы алгоритма позиционирования по трем маякам при различных методах преобразования координат

Как и в предыдущем п.3.5.1 для определения точности измерения абсолютных координат проведены точно такие же опыты, но при распознавании на изображении трёх цветowych маяков. Также за основной параметр стабильности работы алгоритма принята дисперсия абсолютных координат камеры, а за параметр точности – отклонение результатов измерений от истинных значений.

В ходе эксперимента проведено пять опытов, в каждом из которых три маяка высотой 34 мм расставлялись в пространстве по-разному (в пределах порога работоспособности для данного размера маяка и разрешения 640x480 – не более 1,8 м между камерой и маяком), и координаты телекамеры в расчетах должны получаться тоже разными. В каждом из опытов в память компьютера записывалась видеопоследовательность длительностью 180 с, на которой присутствовали упомянутые выше маяки. Причем изображение было статичным (маяки и видеокамера оставались неподвижными), а освещенность сцены – постоянной. Учитывая оценочную частоту кадров при обработке трёх маяков– 10,2 кадр/с, для каждого опыта проведено порядка 1836 измерений.

Данная видеопоследовательность подавалась на вход алгоритма. При этом абсолютные координаты вычислялись двумя методами: методом аффинных преобразований и методом градиентного спуска [82]. Результаты одного из опытов приведены на рис. 3.22.

По результатам пяти опытов построена гистограмма дисперсий абсолютных координат телекамеры, посчитанных с использованием различных методов (рис. 3.23).

Из гистограммы видно, что в различных опытах дисперсии абсолютных координат получились различными. При сравнении двух методов определения координат нельзя однозначно выделить лучший. Метод аффинных преобразований показал лучшие результаты в первом, втором и

пятом опытах (в трех случаях из пяти), а метод градиентного спуска – в третьем и четвертом опытах (в двух случаях из пяти).

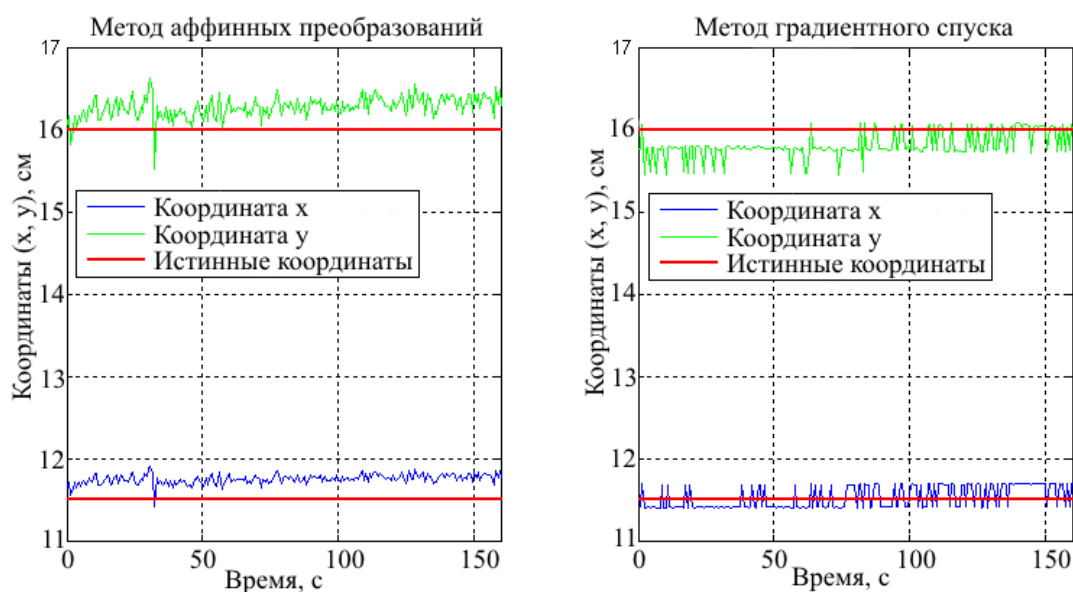


Рис. 3.22. Определение абсолютных координат камеры при использовании трех маяков

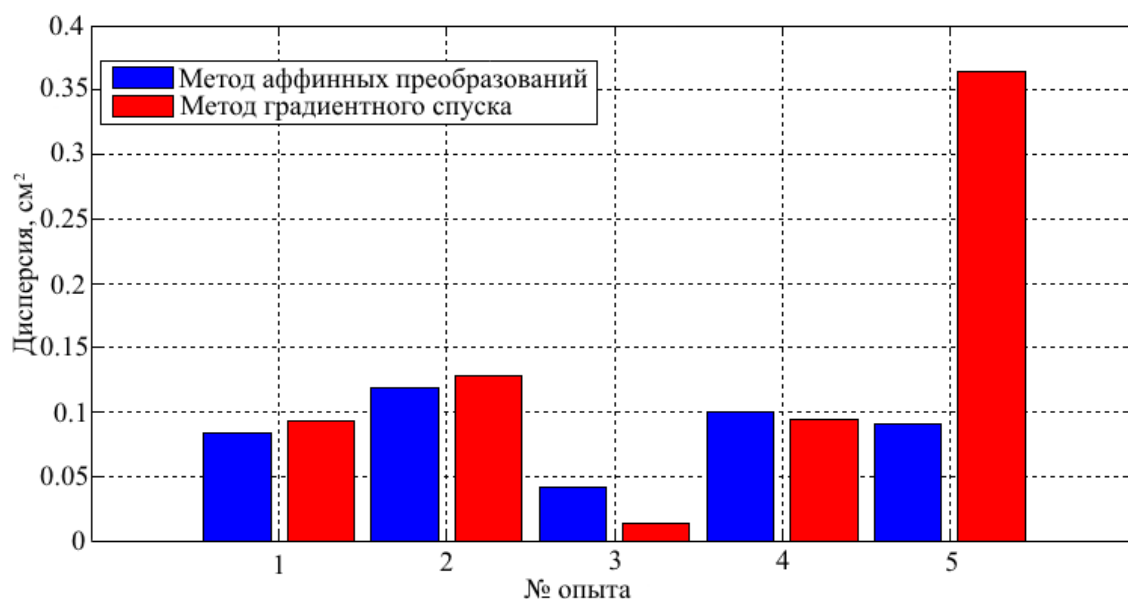


Рис. 3.23. Зависимость дисперсии координат камеры от метода преобразования координат при использовании трех маяков

Также построена гистограмма отклонений абсолютных координат видеокамеры от истинных значений с учетом метода определения координат (рис. 3.24).

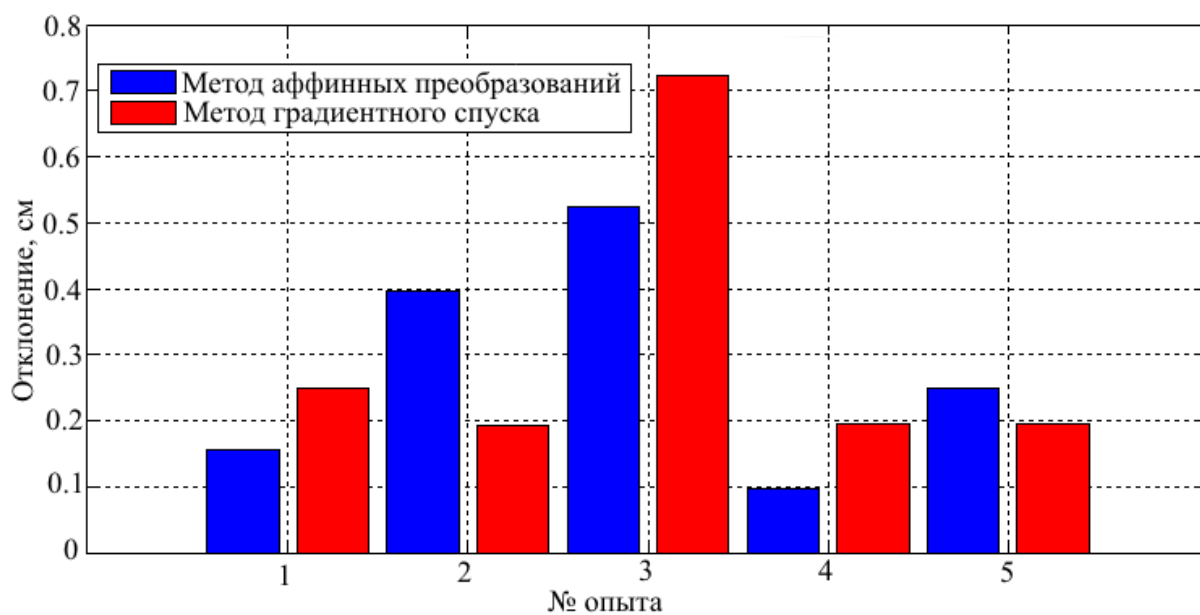


Рис. 3.24. Отклонение координат камеры от истинных значений при использовании трех маяков

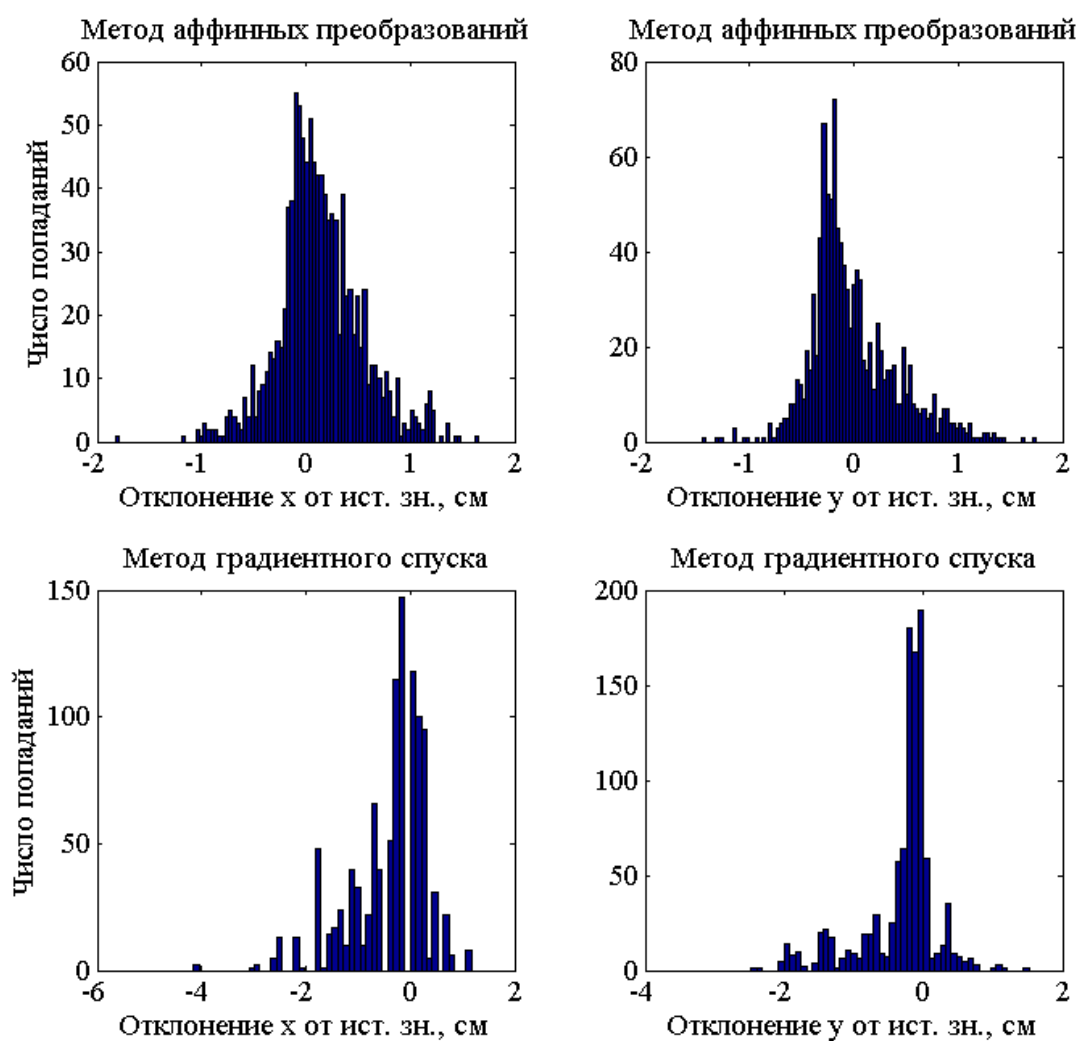


Рис. 3.25. Гистограмма распределения отклонений расчетных координат для 3-х маяков, построенная по всем опытам

Установлено, что в различных опытах отклонения абсолютных координат получились различными. Отклонение абсолютных координат камеры от истинных при нахождении трёх маяков в кадре при использовании метода аффинных преобразований составляет $2,8 \pm 0,6$ мм. Для метода градиентного спуска – $3,1 \pm 0,7$ мм. В данном эксперименте методы преобразования координат показали схожие результаты в пределах погрешности. На рис. 3.25 показана гистограмма распределения отклонений для каждой расчетной координаты при двух методах преобразования, построенная по всем проведенным экспериментам.

3.6. Анализ параметров, влияющих на производительность системы

3.6.1. Исследование производительности алгоритма распознавания при использовании одного маяка.

При исследовании алгоритма позиционирования проведены эксперименты по определению производительности алгоритма позиционирования. За основной параметр взята частота кадров выходной видеопоследовательности. Причем частота кадров на входе алгоритма составляет 30 кадров в секунду.

Производительность, измеренная таким образом, является весьма относительной величиной, так как зависит от технических характеристик персонального компьютера, на котором проводится эксперимент. В приведенных ниже опытах использовался компьютер с двоядерным процессором Intel Dual Core, 2 ГГц, 2 ГБ ОЗУ и видеоадаптером Compaq Nvidia GeForce 9800 GT 512Мб.

При определении производительности алгоритма распознавания при нахождении одного маяка в объективе камеры, маяк произвольно устанавливался в пределах видимости объектива. На входное телевизионное изображение не накладывалось никаких ограничений, кроме числа маяков, участвующих в распознавании.

При использовании одного маяка в течение 300 секунд снимались расчетные данные относительных координат геометрического центра маяка. За частоту кадров на выходе алгоритма распознавания было принято считать количество полученных координат в секунду. Разброс частоты кадров на выходе алгоритма по времени при наличии одного маяка в кадре представлен на рис. 3.26. Средняя частота выходных кадров составила 24,4 кадр/с.

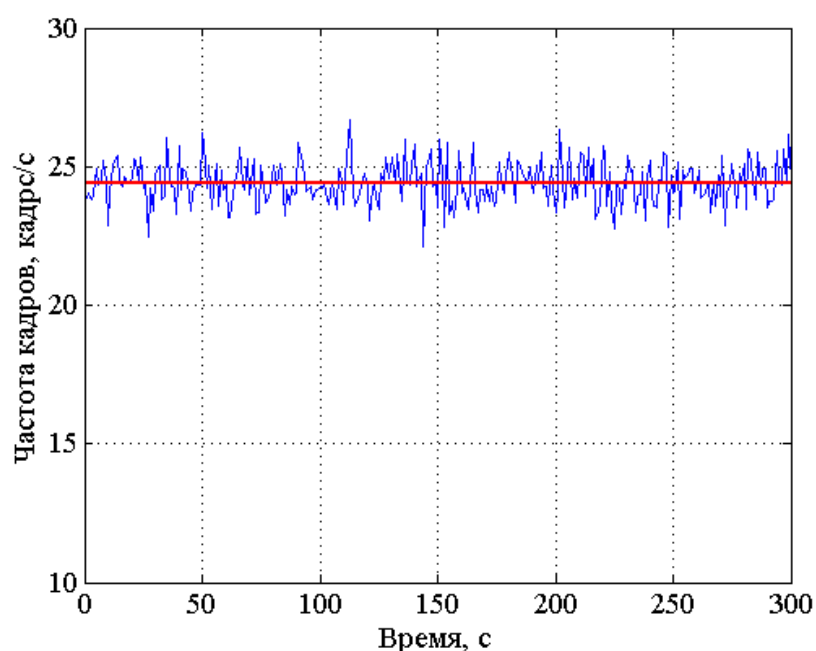


Рис. 3.26. Частота кадров выходной видеопоследовательности при распознавании одного маяка

3.6.2. Исследование производительности системы позиционирования при использовании двух маяков.

Аналогичный эксперимент был проведен при расположении для двух маяков в кадре телекамеры. В ходе работы проведено 5 опытов, в каждом из которых в течении 300 секунд снимались абсолютные координаты телекамеры, рассчитанные по двум маякам. При этом в работе для преобразования относительных координат маяков в абсолютные координаты камеры сначала использовался метод аффинных преобразований, затем метод градиентного спуска. За частоту кадров на выходе алгоритма позиционирования было принято считать количество расчетных абсолютных

координат телекамеры в секунду. Средние значения частоты кадров выходной видеопоследовательности (по 5 опытов для каждого метода преобразования) приведены на рис. 3.27.

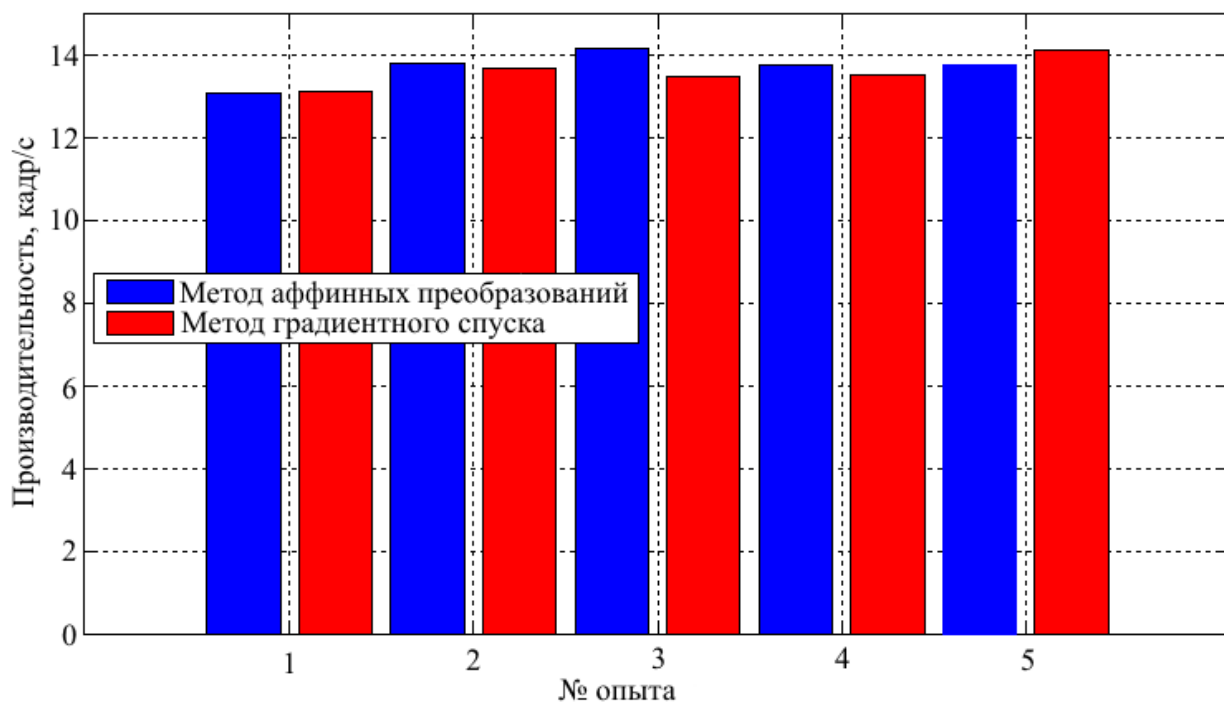


Рис. 3.27. Производительность системы позиционирования при распознавании двух маяков

По результатам экспериментов определено, что средняя производительность составила 13,6 кадров в секунду. Производительность при использовании метода аффинных преобразований незначительно, но выше производительности алгоритма при использовании метода градиентного спуска. Метод аффинных преобразований – 13,7 кадр/с, метод градиентного спуска – 13,5 кадр/с. Разница между средними значениями находится в пределах погрешности. Это связано с тем, что их вычислительная сложность примерно одинаковая. Также можно сказать, что производительность не зависит от сцены, с которой работает алгоритм, так как она (производительность) определена вычислительной сложностью алгоритма в целом.

3.6.3. Исследование производительности алгоритма позиционирования при использовании трёх маяков.

С использованием такой же схемы, как и для двух маяков, проведен похожий эксперимент для трёх маяков, одновременно находящихся в объективе телекамеры. Также проведены по 5 опытов для каждого метода преобразования координат. Результаты приведены на рис. 3.28.

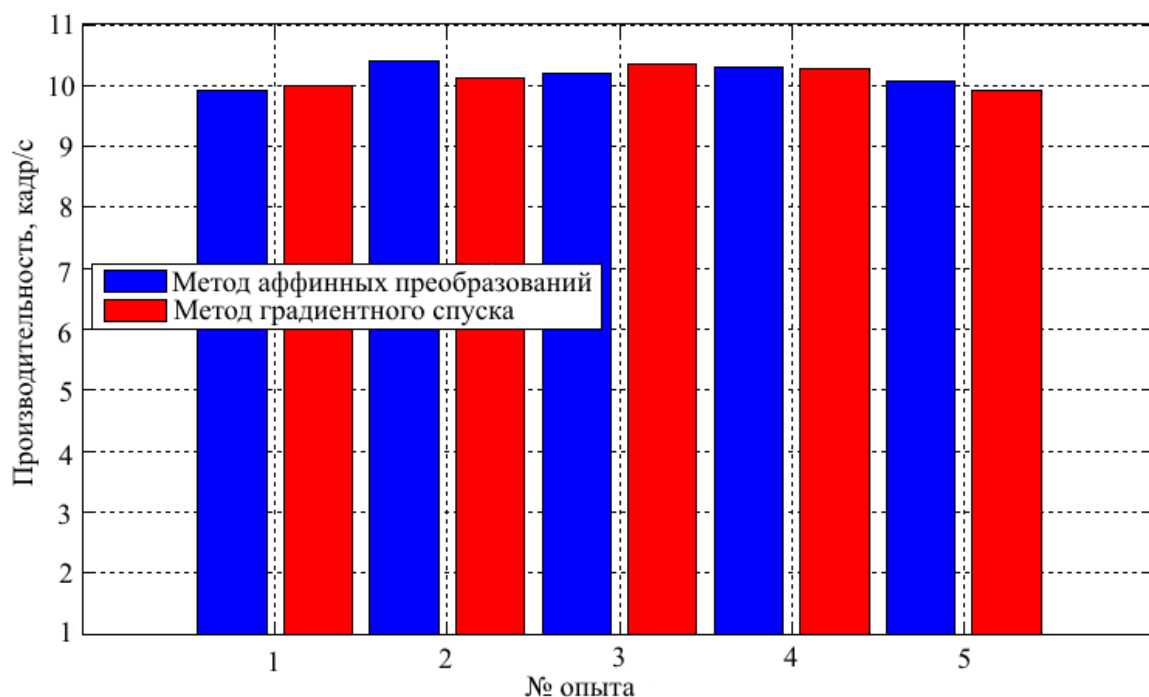


Рис. 3.28. Производительность системы позиционирования при распознавании трёх маяков

Средняя производительность составила 10,2 кадров в секунду. Производительность при использовании метода аффинных преобразований незначительна, но выше производительности алгоритма при использовании метода градиентного спуска. Метод аффинных преобразований – 10,2 кадр/с, метод градиентного спуска – 10,1 кадр/с. Разница между средними значениями находится в пределах погрешности.

Как видно из рис. 3.29, при увеличении количества маяков, участвующих в распознавании, уменьшается производительность алгоритма.

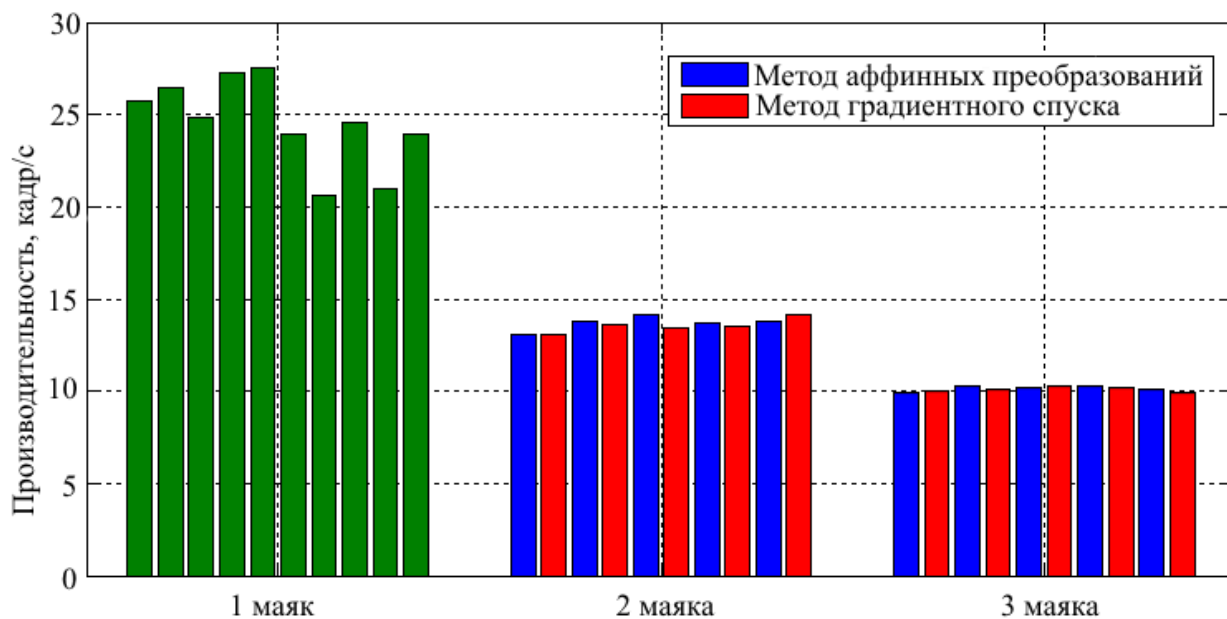


Рис. 3.29. Сравнительная гистограмма производительности при распознавании одного, двух и трёх маяков

Таблица 3.6. Производительность системы

	3 маяка	2 маяка	1 маяк
Метод аффинных преобразований	10,2 кадр/с	13,7 кадр/с	24,4 кадр/с
Метод градиентного спуска	10,1 кадр/с	13,5 кадр/с	

Согласно таблице 3.6, метод аффинных преобразований незначительно превосходит метод градиентного спуска.

В целом показатели производительности алгоритмов позволяют системе работать в режиме реального времени, что является важным фактом для автономного функционирования МРП [81].

3.7. Краткие выводы к главе 3

Исследована система позиционирования в помещении для определения границ её работоспособности. По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Фундаментом работы алгоритма является процедура распознавания цветов, восприятие которых зависит не только от физических

свойств отражающей поверхности, но и от спектра источника света, освещающего рабочую сцену. Поэтому исследовалось качество работы алгоритма при влиянии различных типов внешнего освещения и были использованы: лампа накаливания, люминесцентная лампа, ртутная кварцевая лампа, естественное освещение (в облачную погоду) и прямые солнечные лучи. Работоспособность алгоритма сохранилась при использовании всех типов излучения, что подтвердило низкое влияние вида спектрального состава на работу системы. Стоит отметить, что самая высокая стабильность работы наблюдалась при использовании лампы накаливания и естественного освещения в облачную погоду.

2. Проведенные исследования влияния уровня освещенности показали, что на уровне в 22 люкс алгоритм теряет работоспособность. Это связано с тем, что значения яркости и насыщенности цветового пространства HSV с уменьшением освещенности также падают, и в некоторый момент, когда эти значения выходят за порог цветовой фильтрации с помощью логистического сигмоида, алгоритм перестает распознавать данные цветовой области, как принадлежащие маяку. В целом алгоритм показал устойчивость к низкому уровню освещения.

3. Также эксперименты подтвердили теоретические расчеты максимального угла поворота маяка при максимальных расстояниях между камерой и маяком. Определено, что границей работоспособности является априорно заданное ограничение по минимальному относительному размеру цветовой области маяка на телевизионном изображении. Площадь цветовой области должна быть не менее 100 пикселей, и как только площадь области становится меньше, система отбраковывает её, как не принадлежащую маяку. Проведенные опыты показали, что при высоте маяка, равной 34 мм и разрешении камеры 640x480 максимальное расстояние между камерой и маяком составляет 1,8 м. А уже при размере маяка в 30 см и разрешении телекамеры FullHD (1920x1080) максимальное расстояние возрастает до 48 м, что значительно расширяет масштабы работы и возможные сферы

применения алгоритма. Касательно угла поворота маяка – он также является зависимым и от расстояния камера-маяк, и от разрешения. Чтобы компенсировать возможные потери информации из-за острых углов обзора достаточно вместо маяков плоской формы использовать выпуклую.

4. При повороте МРП возможно «смазывание» объектов на телевизионном изображении с последующей потерей информации, поэтому исследовалось влияние угловой скоростью движения маяка в объективе телекамеры. Порогом стабильной работы определена угловая скорость, равная 25 °/с. Полученный результат является адекватным с точки зрения автономной работы МРП и выполнения простых вспомогательных задач.

5. Исследование точности определения абсолютных координат показало следующие результаты: при ориентации по двум маякам, находящимся в кадре, и использовании метода аффинных преобразований, отклонение абсолютных координат камеры от истинных составило $4,2 \pm 0,7$ мм. При схожих условиях работы и использовании метода градиентного спуска отклонение равнялось $6,1 \pm 1,0$ мм. При наличии трёх маяков в кадре телекамеры значения составили $2,8 \pm 0,6$ мм и $3,1 \pm 0,7$ мм, соответственно. Данные результаты показали высокую точность измерения координат телекамеры (отклонение значительно ниже ее реальных размеров) даже при использовании двух маяков для ориентации в пространстве. Метод аффинных преобразований координат показал более высокую точность.

6. Исследования производительности показали резкое снижение частоты кадров выходной видеопоследовательности с увеличением количества маяков в кадре: 1 маяк – 24,4 кадр/с, 2 маяка – 13,7 кадр/с, 3 маяка – 10,2 кадр/с. Метод аффинных преобразований показал незначительно лучшие результаты. Показатели производительности алгоритмов позволяют системе работать в режиме реального времени, что является важным фактом для автономного функционирования МРП.

4. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ШУМА НА РАБОТУ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

4.1. Вводные замечания

На работу системы позиционирования в процессе работы могут влиять шумы различной природы. Причины возникновения шумов могут происходить на разных этапах работы системы. При проектировании системы позиционирования важно учесть возможное влияние подобных факторов. К таким шумам могут быть отнесены:

1. Шумы, возникающие на уровне полупроводниковых материалов фотосенсора матрицы телекамеры. Уровень таких шумов связан с уровнем темнового тока, который зависит от температуры элементов самой камеры, качества используемых материалов и электромагнитных наводок (как внутренних, так и внешних) [62, 64, 91].
2. Шумы, появление которых связано с низкой освещенностью и возрастанием параметров передаточной функции телекамеры (работа предусилителя и аналого-цифрового преобразователя) [55, 68].
3. Шумы, которые могут накладываться на полезный сигнал в результате передачи данных по каналу связи. Для данного алгоритма позиционирования это может происходить при передаче телевизионного изображения с камеры через модуль приема-передачи на удаленный расчетный модуль.

Степень зашумленности изображения зависит от интенсивности и вида помех [51]. При проектировании системы позиционирования необходимо учесть возможное влияние подобных факторов.

Поэтому для надежного функционирования алгоритма позиционирования важными параметрами являются его устойчивость к шуму и величина ошибки измерений, вызванная шумами различной интенсивности и природы. На сегодняшний день наиболее используемым показателем

оценки качества является пиковое отношение сигнал/шум (для изображений с 256 возможными значениями яркости):

$$ПОСШ = 10 \lg \frac{255^2}{СКО} \quad (4.1)$$

$$СКО = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2 \quad (4.2)$$

где N – число пикселей изображения, x_i и y_i – значения пикселей исходного и зашумленного изображений, соответственно, а $СКО$ – среднеквадратичная ошибка [38, 66].

Знание причины возникновения шумов, визуальный анализ зашумленных кадров помогают в построении модели шума и оценке его статистических характеристик. Для исследования влияния шума на предложенный алгоритм позиционирования исследованы следующие модели шумов [1, 72, 88]:

- Аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ). АБГШ возникает на телевизионном изображении вследствие таких факторов, как шум в электрических цепях, шум фотосенсора – из-за низкого уровня освещения или его высокой температуры. Такая модель может быть описана соотношением зашумленного изображения:

$$g(x, y) = f(x, y) + \eta(x, y), \quad (4.3)$$

где $f(x, y)$ – исходное изображение, $\eta(x, y)$ – независимый от сигнала АБГШ.

Функция плотности распределения вероятности гауссовой случайной величины z задается следующим выражением (рис. 4.1):

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-(z-\mu)^2/2\sigma^2}, \quad (4.4)$$

где z – уровень яркости из всех возможных значений для данного типа изображений (например, для 8-битового изображения $0 \leq z \leq 255$), μ – математическое ожидание случайной величины z , σ – среднеквадратичное отклонение (СКО), σ^2 – дисперсия (мощность вносимого шума).

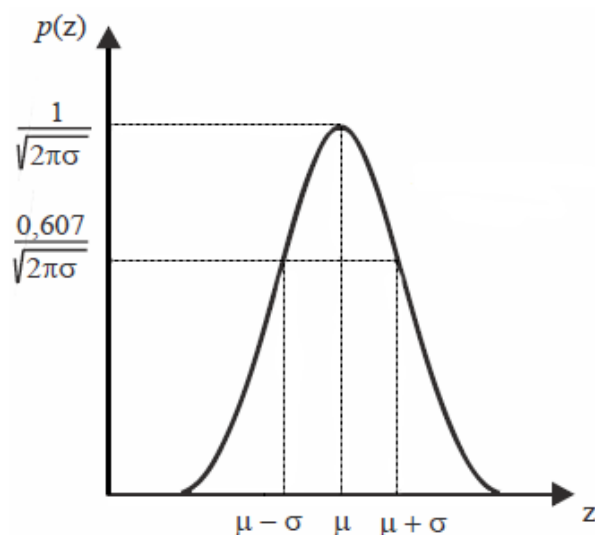


Рис. 4.1. Плотности распределения вероятности гауссовой случайно величины

– Мультипликативный шум. Такой тип шума описывается выражением:

$$g(x, y) = f(x, y) \cdot \eta(x, y) \quad (4.5)$$

$\eta(x, y)$ – мультипликативный шум, зависит от исходного сигнала изображения с определенной функцией плотности распределения вероятностей. Мультипликативный шум является примером спекл-шума, коррелирует с первоначальным изображением, из-за чего подавление такого шума без исходного незашумленного сигнала является сложной задачей.

– Шум «соль и перец». Является импульсным шумом, при котором искажение изображения происходит за счет влияния импульсов, т.е. выбросов с высокими положительными или отрицательными значениями и короткие по длительности. При обработке изображений импульсный шум возникает, например, вследствие ошибок декодирования, которые приводят к появлению черных и белых точек на изображении [1]. Шум «соль и перец» представляется выражением:

$$g(x, y) = (1 - p) f(x, y) + p \cdot i(x, y), \quad (4.6)$$

где $i(x, y)$ – модель импульсного шума, p – бинарный параметр со значениями 1 и 0, который и отражает максимальные и минимальные значения пикселя – «соль» и «перец».

4.2. Исследование влияния шумов на определение относительных координат одного маяка

При распознавании маяка система проводит расчет относительных координат его геометрического центра. Для проведения исследования по влиянию шумов на данный расчетный параметр сначала в память компьютера записывалась видеопоследовательность длительностью 180 с, на которой постоянно присутствовал один маяк. При этом изображение было статичным (маяк и телекамера оставались неподвижными), а освещенность сцены – постоянной. Затем на полученную запись последовательно накладывался шум различной интенсивности.

В опыте использовалось три вида шума: АБГШ, мультипликативный шум с нормальным (гауссовым) распределением и шум «соль и перец». Шум накладывался на все изображение равномерно, варьировалась только его дисперсия.

Для каждой интенсивности шума определялось пиковое отношение сигнал/шум (ПОСШ) изображения по формуле (1). ПОСШ является параметром, характеризующим качество изображения.

Зависимость дисперсии относительных координат одного маяка от уровня искусственно наложенного шума и от типа шума представлена на рис. 4.2.

Из графика видно, что при уровне ПОСШ больше 16 дБ все три вида шума оказывают примерно одинаковое воздействие на алгоритм распознавания. Границей работоспособности алгоритма при наложении АБГШ является величина $16 \pm 0,1$ дБ. При ПОСШ меньше $16 \pm 0,1$ дБ алгоритм не может распознать маяк.

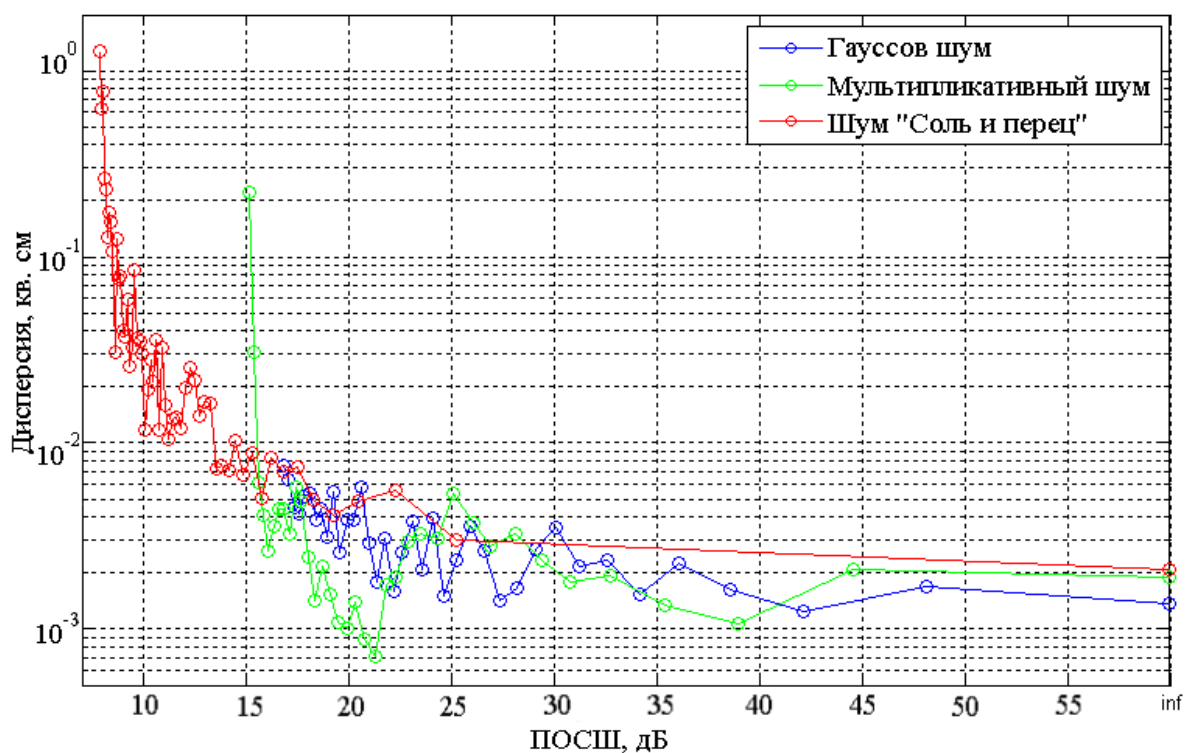


Рис. 4.2. Зависимость дисперсии относительных координат маяка от шума

При воздействии мультипликативным шумом алгоритм дольше сохраняет способность распознавать маяк. Граница работоспособности смещается на уровень $15,1 \pm 0,1$ дБ. Однако, при таком ПОСШ дисперсия резко возрастает (примерно на один порядок).

К шуму «соль и перец» алгоритм оказался наиболее устойчив. Граница работоспособности составила $7,8 \pm 0,1$ дБ, но и дисперсия при таком ПОСШ получилась самой большой. Это объясняется тем, что шум «соль и перец» никак не меняет цветовую составляющую пикселей изображения, он только исключает часть пикселей из обработки алгоритмом. При низких ПОСШ остается достаточное количество пикселей, чтобы классифицировать цветовую область маяка, но из-за случайности воздействия шума относительные координаты центра маяка имеют большую дисперсию.

4.3. Исследование влияния шумов на определение абсолютных координат камеры при распознавании двух маяков

При расположении двух маяков в объективе телекамеры проведены исследования зависимости величины дисперсии абсолютных координат камеры от шума. Для этого записывалась видеопоследовательность длительностью 180 с, на которой присутствовали два маяка. Причем картинка оставалась статичной на всем протяжении эксперимента (ни маяки, ни камера не двигались), а освещенность оставалась постоянной. На первом этапе эксперимента для преобразования относительных координат маяков в абсолютные координаты камеры применялся метод аффинных преобразований.

После формирования видеозаписи на неё накладывался шум различной природы и интенсивности. Снимались значения ПОСШ и дисперсии абсолютных координат камеры. По полученным данным строились графики (рис. 4.3).

Из графика видно, что при уровне ПОСШ больше 16 дБ все три вида шума оказывают примерно одинаковое воздействие на алгоритм позиционирования. Граница работоспособности алгоритма при наложении гауссова шума равна $16 \pm 0,1$ дБ. При ПОСШ меньше $16 \pm 0,1$ дБ алгоритм не может распознать маяк.

При воздействии мультипликативным шумом алгоритм дольше сохраняет способность распознавать маяк. Граница работоспособности смещается на уровень 15,1 дБ. Однако, при таком ПОСШ дисперсия резко возрастает (примерно на один порядок).

К шуму «соль и перец» алгоритм оказался наиболее устойчив. Граница работоспособности составила $8,3 \pm 0,1$ дБ, но и дисперсия при таком ПОСШ получилась самой большой (примерно на два порядка больше средней).

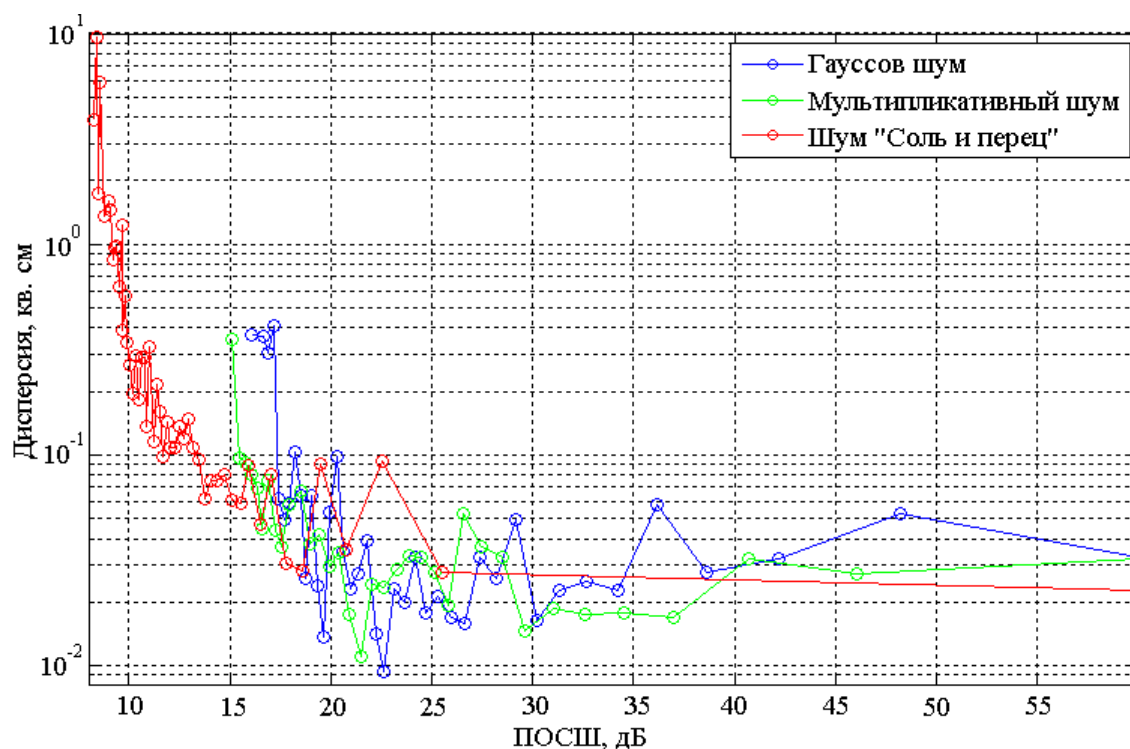


Рис. 4.3. Зависимость дисперсии абсолютных координат камеры от шума при использовании метода аффинных преобразований и распознавании 2 маяков

На втором этапе исследования для преобразования координат использовался метод градиентного спуска. В ходе работы снимались значения ПОСШ и дисперсии абсолютных координат камеры. По полученным данным строились графики (рис. 4.4).

Из графика видно, что при уровне ПОСШ больше 16 дБ все три вида шума оказывают примерно одинаковое воздействие на алгоритм позиционирования. Граница работоспособности алгоритма при наложении гауссова шума равна $16 \pm 0,1$ дБ. При ПОСШ меньше $16 \pm 0,1$ дБ алгоритм не может распознать маяк.

При воздействии мультипликативным шумом алгоритм дольше сохраняет способность распознавать маяк. Граница работоспособности смещается на уровень $14,9 \pm 0,1$ дБ. Однако, при таком ПОСШ дисперсия резко возрастает (примерно на один порядок).

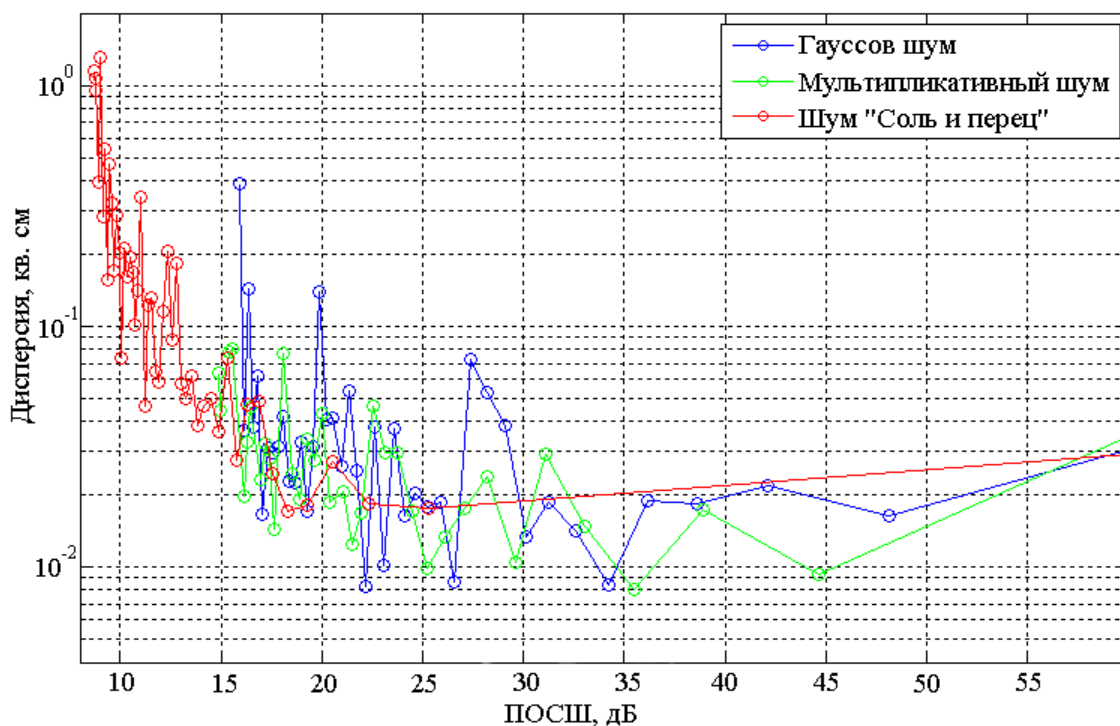


Рис. 4.4. Зависимость дисперсии абсолютных координат камеры маяка от шума при использовании метода градиентного спуска и распознавании 2 маяков

К шуму «соль и перец» алгоритм оказался наиболее устойчив. Граница работоспособности составила $8,6 \pm 0,1$ дБ, но и дисперсия при таком ПОСШ получилась самой большой (примерно на два порядка больше средней).

4.4. Исследование влияния шумов на определение абсолютных координат камеры при распознавании трёх маяков

Такой же эксперимент, как и для двух маяков был проведен с использованием трёх маяков. Исследована зависимость величины дисперсии абсолютных координат камеры от шума для двух случаев: с применением аффинных преобразований относительных координат в абсолютные и метода градиентного спуска.

В ходе работы записывалась видеопоследовательность длительностью 180 с, на которой присутствовали три маяка. Картинка оставалась статичной, при постоянной освещенности. На запись последовательно накладывался

шум разного типа и интенсивности и для каждого отдельно снимались значения дисперсии абсолютных координат камеры.

По полученным данным построены два графика для случая с применением метода аффинных преобразований (рис. 4.5) и с методом градиентного спуска (рис. 4.6), на каждом из которых приведены по три зависимости дисперсии абсолютных координат от трех видов шума: АБГШ, мультипликативного и «Соль и перец».

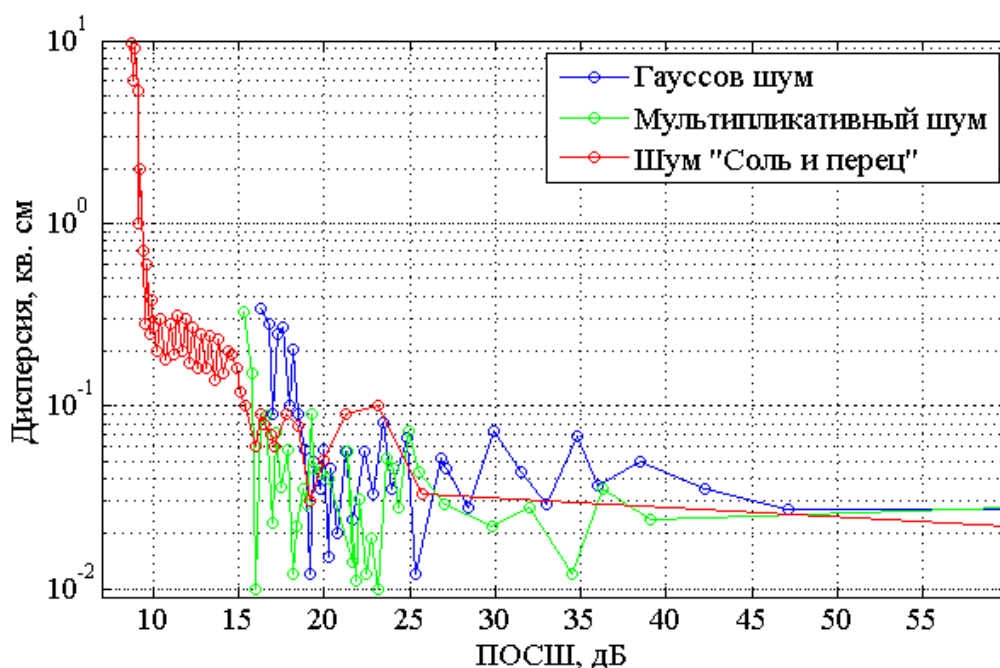


Рис. 4.5. Зависимость дисперсии абсолютных координат камеры от шума при использовании метода аффинных преобразований и распознавании 3 маяков

Из рис. 4.5 видно, что при уровне ПОСШ больше 17 дБ все три вида шума оказывают примерно одинаковое воздействие на алгоритм позиционирования. Граница работоспособности алгоритма при наложении гауссова шума равна $16,3 \pm 0,1$ дБ.

При воздействии мультипликативным шумом алгоритм дольше сохраняет способность распознавать маяк. Граница работоспособности – $15,1 \pm 0,1$ дБ. К шуму «соль и перец» алгоритм также сохранил наибольшую устойчивость. Граница работоспособности составила $8,7 \pm 0,1$ дБ. Но

дисперсия при таких значениях ПОСШ максимальна (примерно на два порядка больше средней).

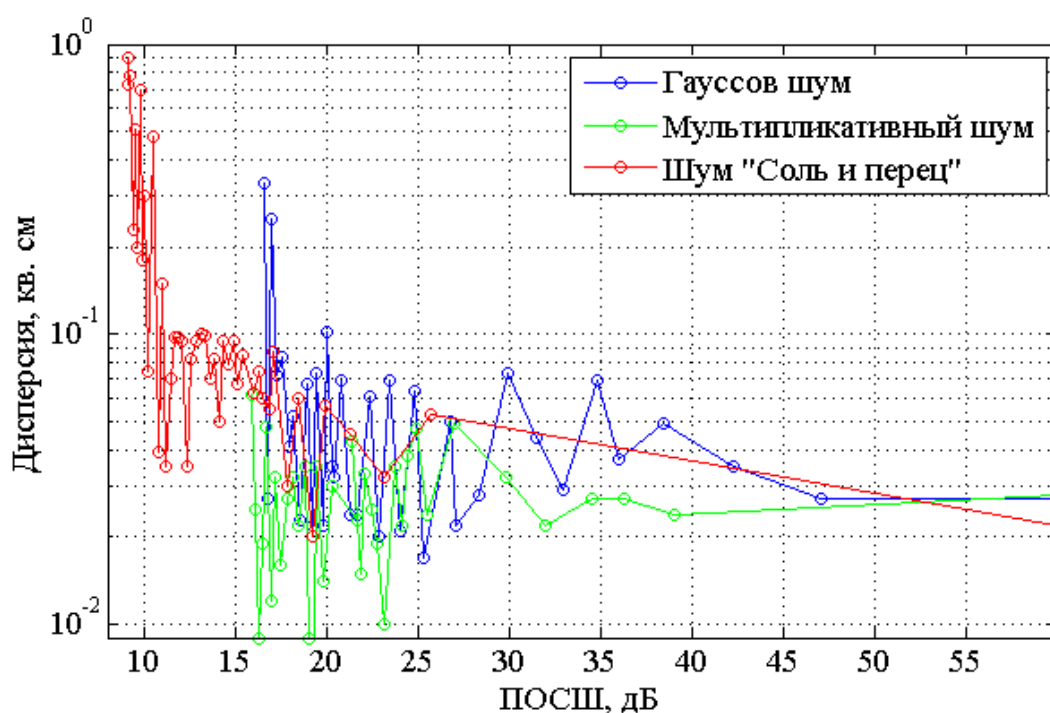


Рис. 4.6. Зависимость дисперсии абсолютных координат камеры от шума при использовании метода градиентного спуска и распознавании 3 маяков

По результатам последнего опыта, приведенного на рис. 4.6 получено: при уровне ПОСШ больше 17 дБ, все три вида шума оказывают примерно одинаковое воздействие на алгоритм позиционирования. Граница работоспособности алгоритма при наложении гауссова шума равна $16,6 \pm 0,1$ дБ.

При воздействии мультипликативным шумом алгоритм дольше сохраняет способность распознавать маяк. Граница работоспособности смещается на уровень $15,9 \pm 0,1$ дБ.

К шуму «соль и перец» алгоритм также наиболее устойчив. Граница работоспособности – $9,1 \pm 0,1$ дБ. Дисперсия при таком ПОСШ получилась максимальной (примерно на два порядка больше средней).

Для сравнения полученных результатов, построена таблица:

Таблица 4.1. Границы работоспособности алгоритма

Кол-во маяков	Метод преобр.	Гауссов шум (ПОСШ/дисперсия)	Мультипликатив. (ПОСШ/дисперсия)	«Соль и перец» (ПОСШ/дисперсия)
1	-	$16 \pm 0,1$ дБ / $0,073$ пикс ²	$15,1 \pm 0,1$ дБ / $0,22$ пикс ²	$7,8 \pm 0,1$ дБ / $1,2$ пикс ²
2	Метод аффинных преобр.	$16 \pm 0,1$ дБ / $0,38$ см ²	$15,1 \pm 0,1$ дБ / $0,35$ см ²	$8,3 \pm 0,1$ дБ / $9,6$ см ²
2	Метод градиентного спуска	$16 \pm 0,1$ дБ / $0,39$ см ²	$14,9 \pm 0,1$ дБ / $0,064$ см ²	$8,6 \pm 0,1$ дБ / $1,2$ см ²
3	Метод аффинных преобр.	$16,3 \pm 0,1$ дБ / $0,34$ см ²	$15,1 \pm 0,1$ дБ / $0,33$ см ²	$8,3 \pm 0,1$ дБ / $9,7$ см ²
3	Метод градиентного спуска	$16,6 \pm 0,1$ дБ / $0,33$ см ²	$15,9 \pm 0,1$ дБ / $0,062$ см ²	$9,1 \pm 0,1$ дБ / $0,9$ см ²

Из анализа полученных результатов исследования установлено, что при увеличении количества маяков в кадре ситуация качественно не изменяется и устойчивость к влиянию шума существенно не увеличивается. Следовательно, для повышения устойчивости алгоритма к влиянию шума использовать четыре и более маяка для позиционирования нецелесообразно, поскольку это приведет в большей степени к понижению производительности алгоритма [81]. Выяснено, что алгоритм наименее устойчив к влиянию гауссова шума, и при уровне ПОСШ ниже 16,6 дБ теряет работоспособность. При влиянии мультипликативного шума границей работоспособности является уровень 15,9 дБ. Наиболее низкий порог работоспособности алгоритм показал при воздействии на него шума «соль и перец» – 9,1 дБ при распознавании трёх маяков. Причем, высокая устойчивость к воздействию шума «соль и перец» сопровождается резким возрастанием дисперсии абсолютных координат камеры. Значение дисперсии на пороге работоспособности более чем на порядок превышает среднее значение дисперсии при различных уровнях ПОСШ.

Сравнение результатов работы алгоритмов преобразования координат показывает, что при использовании метода градиентного спуска система ведет себя более стабильно и показывает низкие значения дисперсии определения координат в сравнении с результатами при использовании метода аффинных преобразований.

4.5. Краткие выводы к главе 4

В исследованиях влияния шума на систему позиционирования использовались три модели шумового воздействия: АБГШ, мультипликативный шум и шум «соль и перец». По результатам определено, что при ПОСШ выше 17 дБ дисперсия абсолютных координат телекамеры находится в пределах $10^{-2} - 10^{-1} \text{ см}^2$ и алгоритм ведет себя стабильно, независимо от модели шумового воздействия.

Установлено, что алгоритм наименее устойчив к влиянию гауссовского шума, и при уровне ПОСШ ниже $16,6 \pm 0,1$ дБ теряет работоспособность. Наиболее низкий порог работоспособности алгоритм показал при воздействии на него шума «соль и перец» – $9,1 \pm 0,1$ дБ. Причем, высокая устойчивость к воздействию шума «соль и перец» сопровождается резким возрастанием дисперсии абсолютных координат камеры. Значение дисперсии на пороге работоспособности более чем на порядок превышает среднее значение дисперсии при различных уровнях ПОСШ.

Установлено, что при увеличении количества маяков в кадре ситуация качественно не изменяется и устойчивость к влиянию шума существенно не увеличивается. Следовательно, для повышения устойчивости алгоритма к влиянию шума использовать четыре и более маяка для позиционирования нецелесообразно.

При использовании метода градиентного спуска система ведет себя стабильнее и показывает более низкие значения дисперсии определения координат, чем при методе аффинных преобразований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертации можно сформулировать в следующем виде:

1. Предложены алгоритмы обработки изображений для задач позиционирования МРП в помещении с использованием прикладной телевизионной системы. Позиционирование происходит по маякам с цветовым кодом.
2. Разработан алгоритм распознавания маяков с цветовым кодом методами цифровой обработки телевизионных изображений. Данный алгоритм проводит предобработку изображения, строит цветовую маску изображения для каждого цвета и анализирует структуру обнаруженных областей для распознавания маяка. Это позволяет алгоритму работать в условиях неоднородного фона и при изменениях внешнего освещения.
3. Разработан алгоритм позиционирования в помещении по маякам с цветовой кодировкой на основе телевизионной измерительной системы. Действие алгоритма основано на модели перспективной проекции с последующим трёхмерным преобразованием координат. Данный подход позволяет достигнуть точности позиционирования порядка $2,8 \pm 0,6$ мм. Точность сравнима с получаемой при использовании лазерных и инфракрасных опорных маяков, при значительной экономии временных и материальных ресурсов на этапе реализации системы.
4. По результатам исследования проведено усовершенствование алгоритма распознавания маяков для минимизации влияния низкой освещенности сцены и цветовой неоднородности фона. Определены параметры фильтрации: для насыщенности системы HSV: кривизна сигмоида $k = 0,3$; смещение пороговой точки сигмоида $\Delta = 30$; для яркости системы HSV: кривизна $k = 0,1$; смещение $\Delta = 50$; для оттенка определена дисперсия: $D = 10$. Определены параметры распознавания маяка: порог разницы в длинах векторов маяка – 10%, максимальный угол между векторами – 7° .

5. Исследовано влияние условий внешнего освещения на работу алгоритма распознавания маяков. В первом опыте по влиянию различных типов внешнего освещения для исследования использованы: люминесцентная лампа, лампа накаливания, ртутная кварцевая лампа, прямые солнечные лучи и естественное освещение в облачную погоду. Для всех источников света алгоритм сохранил свою работоспособность.

Во втором опыте по влиянию уровня освещенности определено, что при понижении уровня освещенности сцены снижаются значения каналов насыщенности S и яркости V для цветowych областей маяка, и при снижении данных значений ниже пороговых цветовая область отбраковывается по цвету. При проведении исследований определен порог освещенности в 22 лк.

6. Исследована зависимость работы алгоритма распознавания от угла поворота маяка. Порогом работоспособности определено понижение относительной площади цветовой области маяка на входном изображении ниже порогового значения в 100 пикселей. Данный порог устанавливается для фильтрации изображения от ложных срабатываний на мелкие цветowe области фона.

Исследована зависимость работы алгоритма распознавания от расстояния между телекамерой и маяком. Данное расстояние зависит от характеристик камеры и от размера маяка. При разрешении телекамеры 640x480 и размере стороны квадратной цветовой области 1 см максимальное расстояние составило 1,81 м, что подтвердило теоретические расчеты. При изменении размера цветовой области маяка до 10 см максимальное расстояние увеличивается до 16 м при таком же разрешении. При тех же условиях, но с разрешением FullHD (1920x1080), максимальное расстояние увеличивается до 48,03 м.

Исследовано влияние скорости движения маяка на работу алгоритма распознавания. Получено, что алгоритм распознавания маяка работает надежно при угловой скорости ниже 25 °/с, при скоростях выше этого

значения распознавание происходит не стабильно, а при скорости выше 35 °/с алгоритм теряет свою работоспособность.

7. Исследована точность работы алгоритма позиционирования. Получены следующие результаты: при работе по двум опорным маякам, находящимся в поле зрения объектива телекамеры, с использованием метода аффинных преобразований и метода градиентного спуска, отклонение её абсолютных координат от истинных составило в $4,2 \pm 0,7$ мм и $6,1 \pm 1,0$ мм, соответственно, для двух методов. При работе по трём маякам в кадре телекамеры данное значение составило $2,8 \pm 0,6$ мм и $3,1 \pm 0,7$ мм, соответственно.
8. Исследования производительности показали сильное снижение частоты кадров выходной видеопоследовательности с увеличением количества маяков в кадре: 1 маяк – 24,4 кадр/с, 2 маяка – 13,7 кадр/с, 3 маяка – 10,2 кадр/с, при условии входной частоты в 30 кадр/с. Показатели производительности алгоритмов позволяют системе работать в режиме реального времени.
9. Исследовано влияние шума на работу алгоритма позиционирования. Из анализа полученных результатов установлено, что количество маяков в кадре телевизионного изображения практически не влияет на устойчивость системы к влиянию шумов. Алгоритм показал наибольшую устойчивость к влиянию шума «соль и перец» – порог работоспособности при ПОСШ $9,1 \pm 0,1$ дБ. Наименьшая устойчивость зафиксирована при влиянии гауссовского шума – порог ПОСШ $16,6 \pm 0,1$ дБ. Причем, высокая устойчивость к воздействию шума «соль и перец» сопровождается резким возрастанием дисперсии абсолютных координат телекамеры. Значение дисперсии на пороге работоспособности более чем на порядок превышает среднее значение дисперсии при различных уровнях ПОСШ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Apalkov I., Khryashchev V., Reznikova I., Zvonarev P.* Neural Network Adaptive Switching Median Filter for the Restoration of Impulse Noise Corrupted Images // Lecture Notes in Computer Science (LNCS 3656), Springer-Verlag, 2005. P. 223-230.
2. *Bradski, G. and Kaehler A.* Learning OpenCV – USA: O'Reilly Media Inc., 2008. pp. 580.
3. *Canny, J.* A computational approach to edge detection // IEEE Trans. Pattern Anal. and Machine Intelligence, 1986. p. 679-698.
4. *Chen J. L., Stockman G.* Indexing to 3D model aspects using 2D contour features // Proc. Int. Conf. Comput. Vision and Pattern Recog. (CVPR), San Francisco, CA (June 18-20), expanded paper to appear in the journal CVIU. 1996. – p. 19.
5. *Ebied, H. M., Witkowski, U., Rückert, U., and Abdel-Wahab, M. S.* Robot Localization based on Visual Landmarks // In Joaquim Filipe, Andrade-Cetto J., Jean-Louis Ferrier, editors, ICINCO 2008, Proceedings of the Fifth International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Robotics and Automation 2, Funchal, Madeira, Portugal, May 11-15, 2008. pp. 49-53.
6. *Faugeras, O., L. Robert, S. Laveau, G. Csurka, C. Zeller, C. Gauclin, Zoghlami.* 3-D reconstruction of urban scenes from image sequences. Comput. Vision and Image Understanding, 1998. p. 292-309.
7. *Fischler, M., R. Bolles* Random consensus: a paradigm for model fitting with applications in image analysis and automated cartography. Communications of the ACM, 1981. p. 381-395.
8. *Forsyth, D., and others* Invariant descriptors for 3-d object recognition and pose. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991. p. 971-991.
9. *Frost C., Jensen C.S., Sørensen K., Thomsen B.* BlueCAML: Bluetooth, Collaborative, And Maintainable Location system [Electronic Resource] //

- Aalborg University (Denmark) [Official site]. URL: <http://people.cs.aau.dk/~luckow/bluecaml-2010.pdf>
10. *Frost C., Jensen C.S., Sørensen K., Thomsen B., Hansen R.* Bluetooth Indoor Positioning System Using Fingerprinting. In: J. Del Ser, E. Axel Jorswieck, J. Miguez, M. Matinmikko, D. P. Palomar, S. Salcedo-Sanz, S. Gil-Lopez (eds.) *Mobile Lightweight Wireless Systems. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, Springer Berlin Heidelberg, vol. 81, 2012, pp 136-150.
 11. *Genzici S., Zhi Tian, Giannakis G.B., Kobayashi H., Moliseh A.F., Poor H.V., Sahinogl Z.* Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks // *IEEE Signal Processing Magazine*, vol.22, 2005.
 12. *Hall, E., J. Tio, C. McPherson, F. Sadjadi* Measuring curved surfaces for robot vision. *Computer*, 1982. p. 385-394.
 13. *Hayet J.B., Lerasle F., Devy M.* A visual landmark framework for mobile robot navigation // *Image and Vision Computing*. 25, 2007, pp.1341–1351
 14. *Huertas, A., G. Medioni* Detection of intensity changes with subpixel accuracy using Laplacian-Gaussian masks // *IEEE-T-PAMI*, 1986. p. 651-664.
 15. *Huttenlocher D., Ullman S.* Recognizing solid objects by alignment. *Proc. DARPA Spring Meeting*, 1988. p. 1114-1122.
 16. *Johnson, A. E., M. Hebert* Efficient multiple model recognition in cluttered 3-D scenes. *Proc. IEEE Conf. Comput. Vision and Pattern Recognition*, 1998. p. 671-677.
 17. *Kiy K.I.* A new real-time method of contextual image description and its application in robot navigation and intelligent control // *Computer Vision in Advanced Control Systems using Conventional and Intelligent Paradigms*, Springer Book Series 8578, December, 2014.
 18. *Kiy K.I.* A New Real-Time Method of Contextual Image Description and Its Application in Robot Navigation and Intelligent Control. In: *Favorskaya M., Jain L.C. (eds.) Computer Vision in Control Systems 2, Intelligent Systems*

- Reference Library, Vol. 75, Springer International Publishing, Switzerland, 2015. pp. 109–133.
19. *Lashkari A.H., Parhizkar B., Ngan M.N.A.* WIFI-Based Indoor Positioning System // Computer and Network Technology (ICCNT). 2010 Second International Conference. 23–25 April 2010. pp.76–78.
 20. *Le Thanh Son, Orten P.* Enhancing Accuracy Performance of Bluetooth Positioning // Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC 2007. IEEE , vol., no., pp.2726–2731, 11-15 March 2007.
 21. *Mata M., Armingol J. M., de la Escalera A., and Salichs M.A.* A visual landmark recognition system for topological navigation of mobile robots // In Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'01), 2001.
 22. *Niblack W., and others* The QBIC project: Querying images by content using color, texture, and shape. SPIE Proc. Storage and Retrieval for Image and Video Databases, 1993. p. 173-187.
 23. *Prewitt, J.* Object enhancement and extraction. In Picture Processing and Psychopictorics, B. Lipkin, A. Rosenfeld, eds. Academic Press, New York, 1970. p. 75-149.
 24. *Priorov A., Tumanov K., Volokhov V.* Efficient Denoising Algorithms for Intelligent Recognition Systems. In: Favorskaya M., Jain L.C. (eds.) Computer Vision in Control Systems-2, Intelligent Systems Reference Library, Vol. 75, Springer International Publishing, Switzerland, 2015, pp. 251–276.
 25. *Prozorov A.; Tyukin A.; Lebedev I.; Priorov A.*, Self-localization of mobile robot in unknown environment // Open Innovations Association (FRUCT), 2015 17TH Conference of, Yaroslavl, Russia, pp.173-178, 20-24 April 2015.
 26. *Roberts, L. G.* Machine perception of three-dimensional solids. In Computer Methods in Image Analysis, J. K. Aggarwal, R. O. Duda, A. Rosenfeld, eds. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA. 1977. 341 p.
 27. *Shapiro L., Stockman G.* Computer Vision. Prentice Hall, 2001, p. 617.
 28. *Stockman G., Kopstein S., Benett S.* Matching images to models for registration and object detection via clustering. IEEE Trans. PA MI, 1982. p. 229-241.

29. *Stockman, G.* Object recognition and localization via pose clustering. *Comput. Vision, Graphics and Image Proc.*, 1987. p. 361-387.
30. *Tyukin A., Lebedev I.* The Development and Research the Digital Image Processing Algorithm on Television Picture for Indoor Positioning. // Paulus D., Fuchs C., Droege D. (eds.) 9th Open German-Russian Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding (OGRW 2014), Electronic on-site Proceedings, Koblenz, Germany, 2014.
31. *Tyukin A.; Lebedev I.; Priorov A.* The development and research of the indoor navigation system for a mobile robot with the possibility of obstacle detection // Open Innovations Association (FRUCT16), 2014 16th Conference of, Oulu, Finland, pp.115-122, 27-31 Oct. 2014.
32. *Yudin D.A., Postolsky G.G., Kizhuk A.S., Magergut V.Z.* Mobile Robot Navigation Based on Artificial Landmarks with Machine Vision System // *World Applied Sciences Journal* 24 (11): 1467-1472, 2013.
33. *Zhang C., Subbu K.P., Luo J., Wu J.* "GROPING: Geomagnetism and cROwdsensing Powered Indoor NaviGation," *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 2. pp. 387–400. 2015.
34. *Абдрахманова А.М., Намиот Д.Е.* Использование двумерных штрихкодов для создания системы позиционирования и навигации в помещении // *Прикладная информатика*, №1, СПб: Лань, С.31-39, 2013.
35. *Алпатов Б.А.* Оценивание параметров движущегося фрагмента двумерного изображения. – *Техника средств связи. Сер. Техника телевидения*, 1991, № 2, с. 77-81.
36. *Алпатов Б.А., Бабаян П.В.* Разработка алгоритма слежения за фоновым изображением для видеокомпьютерной системы обнаружения и определения координат движущихся объектов // *Проблемы математического моделирования и обработки информации в научных исследованиях: Сб. науч. тр. – Рязань: РГРТА, 2003, с. 3-15.*
37. *Анисимов Б.В., Злобин В.К., Курганов В.Д.* Распознавание и цифровая обработка изображений. – М.: Высшая школа, 1983. – 294 с.

38. *Апальков И.В.* Усовершенствование алгоритмов удаления шума из изображений на основе модифицированных критериев оценки качества: автореф. дис. к-та тех. Наук: 05.12.04 / И.В.Апальков. М., 2008.
39. *Бабаян П.В., Алпатов Б.А.* Выделение движущихся объектов в условиях геометрических искажений изображении. – Цифровая обработка сигналов, 2004, №4, с. 9-14.
40. *Бабаян П.В., Алпатов Б.А.* Методы обработки и анализа изображений в бортовых системах обнаружения и сопровождения объектов. - Цифровая обработка сигналов. 2006, №2, с. 45-51.
41. *Бакут П.А., Колмогоров Г.С., Ворновицкий И.Э.* Сегментация изображений: Методы выделения границ областей. Зарубежная радиоэлектроника, 1987, №10, с. 25-47.
42. *Бакута П.А.* Применение методов сегментации изображений в автономных системах обнаружения, распознавания и сопровождения движущихся целей /Под ред. П.А. Бакута. - Зарубежная радиоэлектроника, 1987, № 10, с. 48-80.
43. *Барсуков Ф.И., Величкин А.И., Сухарев А.Д.* Телевизионные системы летательных аппаратов / Под ред. А.И. Величкина. – М.: Сов. радио, 1979. – 256 с.
44. *Безруков В.Н., Балобанов В.Г.* Системы цифрового вещательного и прикладного телевидения. – Учебное пособие для вузов / Под ред. профессора В.Н. Безрукова – Горячая линия-Телеком. М., 2015. 608 с.
45. *Белобрюхов М.С., Романенко А.В.* Система машинного зрения для киберфутбола // Доклады ТУСУРа, № 2 (24), часть 2, декабрь, 2011, С. 200-203.
46. *Бернюков А.К.* Использование процедур цифрового ограничения для вычисления вектора признаков распознаваемых образов // Проектирование и технология электронных средств, 2013, №2.

- 47.Бугров В.Н., Бессонова Е.В. Численное проектирование гауссовых цифровых фильтров // Проектирование и технология электронных средств, 2012, №3, С. 40-43.
- 48.Волков А.Н., М.А. Сиверс, В.А.Сухов Позиционирование в сетях Wi-Fi // Вестник связи, №11, 2010, С. 28–33.
- 49.Волохов, В.А. Подавление гауссовского шума в изображениях на основе анализа главных компонент и нелокальной обработки: автореф. дис. ... к-та тех. Наук: 05.12.04 / В.А.Волохов. Владимир, 2012.
- 50.Гмарь Д.В., Кротенок К.И. Навигация внутри зданий с использованием беспроводной сети (на примере кампуса ВГУЭС) // Материалы XX Всероссийской научно-методической конференции «Телематика'2013». – СПб, 2013.
- 51.Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. - М.: Техносфера, 2005, 1104с.
- 52.Горелик С.Л., Кац Б.М., Киврин В. И. Телевизионные измерительные системы – М.: Связь, 1980. – 168 с.
- 53.Грязин Г.Н. Основы и системы прикладного телевидения: учеб. пособие для вузов. Под ред. Н.К. Мальцевой. - СПб.: Политехника, 2011. - 274 с.
- 54.Дворкович В.П., Дворкович А.В. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика) // Техносфера, 2012. 1008 с.
- 55.Джакония В.Е. I. Физические основы телевидения // Телевидение. – М.: «Горячая линия – Телеком», 2007. – С. 19–115. – 618 с.
- 56.Джакония В.Е. II. Преобразование изображений в электрические сигналы и воспроизведение изображений // Телевидение. – М.: «Горячая линия – Телеком», 2002. – С. 105–134. – 640 с.
- 57.Зубарев Ю.Б., Дворкович В.П., Дворкович А.В. Проблемы и перспективы внедрения информационных мультимедийных систем в России // Электросвязь, 2004. №10. С. 11-16.
- 58.Казанцев Г.Д., Курячий М.И., Пустынский И.Н. Измерительное телевидение: Учеб. пособие для вузов / М.: Высш. шк., 1994. – 288 с.

59. *Карпов В.Э., Платонова М.В.* Система навигации мобильного робота // Информационные средства и технологии. Труды XVIII Международной научно-технической конференции, Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2010, с. 56-63.
60. *Кий К.И., Смирнов А.М.* Автономная навигация в помещениях робота “Амур” по цветовым меткам // Электронный научно-технический журнал «Техническое зрение», выпуск 2, С.30-36, 2013.
61. *Коротаев В.В., Краснящих А.В.* Телевизионные измерительные системы / Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 108 с.
62. *Костильов В.П., Слусар Т.В., Суший А.В., Черненко В.В.* Про покращення чутливості кремнієвих фотосенсорів // Прикладна радіoeлектроніка: наук.-техн. журнал. – 2012. Том 11. № 3. – С. 440-444.
63. *Костров Б.В., Упакова А.Г.* Квазидвумерная фильтрация синхронных помех на изображении // Проектирование и технология электронных средств, 2012, №1, С. 32-36.
64. *Костылев В. П., Слусар Т. В. и др.* Об улучшении чувствительности кремниевых фотосенсоров // Прикладная радиоэлектроника : науч.-техн. журн. – Х. : ХНУРЭ, 2012. – Т. 11, № 3. – С. 440–441.
65. *Кругликов С.В.* Научно-методический аппарат обоснования перспективных направлений развития автоматизированных систем управления // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. № 12. С. 44–51.
66. *Лебедев И.М., Приоров А.Л., Тюкин А.Л.* Анализ алгоритмов обработки телевизионного изображения для задач позиционирования и беспрепятственного передвижения мобильного робота в помещении // Доклады 17-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA-2015), Москва, 2015. Т. 2. С. 605-609.
67. *Лебедев И.М., Тюкин А.Л., Приоров А.Л.* Разработка и исследование системы навигации внутри помещений для мобильного робота, с возможностью детектирования препятствий // Информационно-

- измерительные и управляющие системы, М.: Радиотехника, 2015, №1, т.13. С. 53-61.
68. *Майоров В.П., Овчинников Л.Ф., Сёмин М.С.* Рассуждения о телевизионных камерах (рус.) // Компьютерра : журнал. — 1998. — . — ISSN 0815-2198.
69. *Миниахметов Р.М., Rogov A.A., Цымблер М.Л.* Обзор алгоритмов локального позиционирования для мобильных устройств // Вестник ЮУрГУ. Сер. Вычислительная математика и информатика. – 2013. – Т. 2. – № 2. – С. 83–96.
70. *Патрик Э.* Основы теории распознавания образов: Пер. с англ. / Под ред. Б.Р.Левина. М.: Сов. радио, 1980. 408 с.
71. *Платонова М.В.* Использование шумоподобных сигналов ИК-диапазона для системы навигации мобильных роботов // Сборник «Мобильные роботы и мехатронные системы». – М.: Издательство Московского университета, 2009. – с. 148-155.
72. *Приоров А.Л., Куйкин Д.К., Хрящев В.В.* Детектирование и фильтрация импульсного шума со случайными значениями импульсов // Цифровая обработка сигналов. 2010. № 1. С. 18 22.
73. *Прозоров А.В., Приоров А.Л.* «Трёхмерная реконструкция сцены с применением монокулярного зрения» // Измерительная техника, 2014 г., №10, С. 24-29.
74. *Прэтт У.* Цифровая обработка изображений. - М.: Мир, 1982.
75. *Пулятин Е.П., Аверин С.И.* Обработка изображений в робототехнике. – М.: Машиностроение, 1989. – 320 с.
76. *Пулятин Е.П., Аверин С.И.* Обработка изображений в робототехнике. – М.: Машиностроение, 1990. 320 с.
77. Российские разработчики представили высокоточную платформу для навигации внутри помещений Indoor Positioning Systems (IPS) [Электронный ресурс] // GPS CLUB – сообщество любителей и

- профессионалов [Офиц. сайт]. URL: http://www.gps-club.ru/gps_think/detail.php?ID=107999 (дата обращения: 24.08.2015).
78. *Селяев А.А., Алпатов Б.А.* Алгоритм оценки местоположения объекта на двумерном изображении. - Изв. вузов. Сер. Приборостроение, 1988, №5, с. 3-5.
79. *Сойфер В.А.* Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2003. 784 с.
80. *Ту Дж., Гонсалес Р.* Принципы распознавания образов // Под редакцией Ю.И. Журавлева М.: Мир. 1978.
81. *Тюкин А.Л.* О скорости цифровой обработки телевизионного изображения для алгоритма позиционирования в помещении // Докл. междунар. конф. «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – РЭУС-2015». 2015. С. 300–304.
82. *Тюкин А.Л., Лебедев И.М., Приоров А.Л.* Разработка и оценка качества работы алгоритма цифровой обработки телевизионных изображений для задач позиционирования в замкнутом пространстве // Нелинейный мир, М.: Радиотехника, 2014. Т. 12, № 12. С. 26–30.
83. *Тюкин А.Л., Трубкин А.В.* Исследование алгоритма навигации мобильной платформы, с использованием цветковых маяков, «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание-2013»: сб. материалов XI Междунар. Науч.-техн. Конф. / ред. Кол.: С.Г. Емельянов [и др.]; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2013, С.437-438
84. *Форсайт Д., Понс Ж.* Компьютерное зрение. Современный подход. 2004. 514 с.
85. Цифровая обработка телевизионных и компьютерных изображений / Под ред. Ю.Б. Зубарева и В.П. Дворковича. М.: 1997. 252 с.
86. *Чобану М.К.* Многомерные многоскоростные системы обработки сигналов // М.: Техносфера, 2009. 480 с.

87. *Шати́ро Л., Стокман Дж.* Компьютерное зрение. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.
88. *Шмаглит Л.А., Приоров А.Л., Хрящев В.В., Матвеев Д.В.* Детектирование лиц на изображениях в условиях аддитивного белого гауссовского шума // Электромагнитные волны и электронные системы, М.: Радиотехника, №5, 2014, С. 62-70.
89. *Щекотов М.С., Кашевник А.М.* Сравнительный анализ систем позиционирования в помещениях, основанных на технологиях связи, поддерживаемых смартфонами // Тр. СПИИРАН. 2012. Вып. 23. 459–471с.
90. *Яковенко И.А., Гапанюк Ю.Е.* Навигация внутри помещений. Обзор и сравнительный анализ технологий: GSM, Bluetooth, Wi-Fi, GPS, RFID, NFC [Электронный ресурс] // Молодежный научно-технический вестник [Электронный журнал]. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, Эл No. ФС77-51038, 2015. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/780724.html> (Дата обращения 24.08.2015).
91. *Ярошенко С.* Фотосенсоры от компании Foveon [Электронный ресурс] // Сайт Comprice.ru, 04.11.2005 URL: <http://www.comprice.ru/articles/detail.php?ID=40191> (Дата обращения 24.08.2015).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015618779

ICB-Positioning - система позиционирования в помещении

Правообладатели: *Тюкин Александр Леонидович (RU), Лебедев Илья Михайлович (RU), Приоров Андрей Леонидович (RU)*

Авторы: *Тюкин Александр Леонидович (RU), Лебедев Илья Михайлович (RU), Приоров Андрей Леонидович (RU)*



Заявка № 2015615241

Дата поступления 10 июня 2015 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 18 августа 2015 г.

Заместитель руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

Общество с ограниченной ответственностью «А-ВИЖН»
Юридический адрес: 150054, г. Ярославль, ул. Угличская, 31-43
Почтовый адрес: 150040, г. Ярославль, пр. Октября, 56, оф. 406
тел: +7 (4852) 64 07 06, e-mail: connect@a-vsn.ru
ИНН 7604082087 КПП 760401001 БИК 047888732

УТВЕРЖДАЮ

Директор
ООО «А-ВИЖН»
И.В. Апальков
«3» октября 2015 г.



Акт

о внедрении результатов диссертационной работы Тюкина Александра Леонидовича, выполненной в Ярославском государственном университете имени П.Г. Демидова (ЯрГУ), на тему «Разработка и анализ алгоритма цифровой обработки телевизионных изображений для задач позиционирования в помещении по маякам с цветовой кодировкой».

Комиссия в составе: председатель комиссии – технический директор Конюхов А.С., члены комиссии – руководитель группы, к.т.н. Савватин А.И., инженер-программист Герасимов Н.Б., рассмотрев диссертационную работу Тюкина А.Л., составила настоящий акт о том, что ее результаты нашли применение в работе ООО «А-ВИЖН». Особый практический интерес представляют следующие результаты диссертации:

1. Алгоритм обнаружения цветных объектов на изображении путём предобработки телевизионного изображения и анализа структуры объекта для условий переменного освещения и неоднородного фона.

2. Результаты исследования по настройке параметров фильтрации изображения для работы алгоритма обнаружения цветных объектов в условиях неоднородного цветного фона и переменного освещения.

Предложенный алгоритм использован при разработке программного комплекса «Murus.Video» для обработки видеопотока, полученного с камер видеонаблюдения. Внедрение позволило повысить эффективность применения программного комплекса в задачах автоматизации складского учета.

Члены комиссии:

А.С. Конюхов

А.И. Савватин

Н.Б. Герасимов

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «ПАНТЕОН»

С.И. Тигин
«06» августа 2015 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Тюкина Александра Леонидовича, выполненной в Ярославском государственном университете им. П.Г. Демидова (ЯрГУ), на тему «Разработка и анализ алгоритма цифровой обработки телевизионных изображений для задач позиционирования в помещении по маякам с цветовой кодировкой»

Результаты диссертационной работы Тюкина А.Л. нашли применение в разработках многоотраслевого ООО «ПАНТЕОН». Особый практический интерес представляют следующие результаты диссертации:

1. Разработанная программа «ICB-Positioning – система позиционирования в помещении» для исследования алгоритма обнаружения и алгоритма позиционирования в условиях переменного освещения.

2. Алгоритм фильтрации телевизионного изображения для классификации маяков на сложном цветовом фоне.

Используемые алгоритмы в разработанной системе позиционирования исследуются в рамках проекта по автоматизации работы складских помещений с использованием автономных роботизированных комплексов.

Главный инженер

A handwritten signature in blue ink, likely belonging to S.I. Vovchok.

С.И. Вовчок

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор Ярославского
государственного университета
им. П.Г. Демидова

С.А. Кашенко

« 13 » _____ 2015 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Тюкина Александра Леонидовича на тему «Разработка и анализ алгоритмов цифровой обработки телевизионных изображений для задач позиционирования в помещении по маякам с цветовой кодировкой» в научно-исследовательские работы

Результаты диссертационной работы Тюкина А.Л., представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения», были использованы в научно-исследовательских работах:

– при выполнении НИР «Разработка нелинейных алгоритмов цифровой обработки речевых сигналов, изображений и видеопоследовательностей на основе модифицированных критериев оценки качества» в рамках программы «Конкурс проектов фундаментальных научных исследований, выполняемых молодыми учеными – докторами или кандидатами наук, в научных организациях Российской Федерации в 2016-2018 годах» (грант № 15-08-99639-а) внедрен алгоритм обнаружения цветowych объектов на телевизионных изображениях монокулярного зрения.

Заведующий кафедрой динамики
электронных систем, профессор, д.т.н.

Ю.А. Брюханов

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор Ярославского
государственного университета
им. П.Г. Демидова

С.А. Кащенко
«23» _____ 2015 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Тюкина А. Л. на тему

«Разработка и анализ алгоритма цифровой обработки телевизионных
изображений для задач позиционирования в помещении по маякам с
цветовой кодировкой»

в учебный процесс

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой динамики электронных систем, профессор, д.т.н. Брюханов Ю.А. и доцент кафедры динамики электронных систем, к.т.н. Волохов В.А. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Тюкина А.Л. внедрены в учебный процесс на кафедре динамики электронных систем физического факультета ЯрГУ (специальность «Радиотехника»):

– в курсе «Цифровая обработка изображений» – результаты применения алгоритмов фильтрации изображений для повышения уровня распознавания цветowych объектов на телевизионном изображении;

– в курсе «Цифровые телевизионные системы» – результаты разработки алгоритма позиционирования с использованием модели перспективной проекции для проведения телевизионных измерений.

– При выполнении студентами курсовых и дипломных проектов используется разработанная Тюкиным А.Л. программа ICB-Positioning для определения местоположения мобильной платформы в помещении.

Заведующий кафедрой динамики
электронных систем, профессор, д.т.н.

Ю.А. Брюханов

Доцент кафедры динамики
электронных систем, к.т.н.

В.А. Волохов