

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий механики и оптики

На правах рукописи

Нгуен Хоанг Вьет

**АКТИВНАЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ
СИСТЕМА АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ
СРЕДСТВ**

05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

д.т.н., профессор

Коротаев Валерий Викторович

Санкт-Петербург – 2014

Оглавление

Введение.....	5
1. Обзор систем безопасности движения автомобиля.....	11
1.1. Описание задачи контроля за состоянием дороги оптико-электронной системой	11
1.2. Концепция автономного автомобиля и использование в ней оптико-электронных систем.....	11
1.3. Классификация системы анализа окружающей среды автомобиля.....	13
1.4. Активная система.....	14
1.4.1. Ультразвуковая система.....	14
1.4.2. Радарная система.....	15
1.4.3. Лазерная система	20
1.4.3.1. Лазерный дальномер.....	20
1.4.3.2. Триангуляционный метод.....	28
1.5. Пассивная система	34
1.5.1. Моноканальная оптико-электронная система.....	35
1.5.1.1. Движущаяся камера.....	35
1.5.1.2. Одна камера с разделенным оптическим каналом.....	36
1.5.2. Многоканальная оптико-электронная система: стереоскопический метод.....	37
1.6. Выводы по главе 1.....	42
2. Разработка методики автоматической калибровки стереоскопической системы.....	44
2.1. Анализ существующих методов калибровки камеры и стереоскопической системы.....	44

2.2. Калибровка камеры и стереоскопической системы методом Тсай с большим количеством параметров камеры	48
2.3. Методика автоматической калибровки стереоскопической системы	56
2.4. Выводы по главе 2.....	65
3. Выбор и исследование принципа работы, структурной схемы и основных параметров активной стереоскопической системы.	66
3.1. Структурная схема и ее анализ.....	66
3.2. Выбор схемы расположения камеры	69
3.2.1. Математический анализ погрешности измерения стереоскопической системы при фиксированной погрешности определения сопряженных точек в стереопаре.	70
3.2.2. Результаты анализа погрешности измерения стереоскопической системы в среде Matlab и на физической модели	73
3.3. Методика расчета основных геометрических параметров активной стереоскопической системы безопасности автомобиля.....	80
3.4. Выводы по главе 3.....	87
4. Методика обработки изображения активной стереоскопической системы с целью применения в активной системе безопасности автомобиля	89
4.1. Предварительная обработка изображений	89
4.2. Методика получения трехмерных координат объектов в активной стереоскопической системе.....	92
4.3. Алгоритм выделения объектов из облака точек	99
4.4. Алгоритм различения объектов друг от друга.....	102
4.5. Выводы по главе 4.....	107

Заключение	109
Список литературы	111

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ИИ – источник излучения.

КМОП – комплементарный «металл-окисел-полупроводник».

ОЭС – оптико-электронная система.

ПЗС – прибор с зарядовой связью.

АСОЭС – активная стереоскопическая оптико-электронная система

Введение

Актуальность работы. По результатам анализа, проведенного государственной инспекцией безопасности дорожного движения (ГИБДД), ежегодное количество дорожно-транспортных происшествий (ДТП) на территории России составляет около 150000 [1]. За 5 лет потери российской экономики от ДТП составили около 5,5 триллиона рублей [2]. Основной причиной ДТП является нарушение правил дорожного движения (ПДД) водителями транспортных средств и неудовлетворительное состояние улиц и дорог. Эти потери во многом могут быть уменьшены с помощью системы, которая анализирует пространство вокруг транспортных средств и предварительно предупреждает водителя о возможности столкновения.

С развитием вычислительной техники технологии компьютерного зрения все больше применяются в различных отраслях науки и техники. Одной из важных областей применения компьютерного зрения является обеспечение безопасности человека при движении в автомобиле. Технологии компьютерного зрения часто основаны на использовании оптико-электронных систем. На автомобиле оптико-электронная система может быть применена в качестве активной системы безопасности, направленной на предотвращение ДТП и исключение предпосылок их возникновения.

По сравнению с другими активными системами безопасности автомобиля, такими как ультразвуковая или радарная системы, оптико-электронная система имеет некоторые преимущества: дальность действия, разрешающая способность и точность измерения.

Оптико-электронными системами, которые могут быть использованы в качестве активной системы безопасности автомобиля, являются лазерный дальномер, лидар, триангуляционная система, пассивная стереоскопическая система, активная стереоскопическая система. Лазерный дальномер и лидар имеют сложную структурную схему и высокую стоимость. Поэтому такие

системы редко применяют в настоящее время. В триангуляционной системе необходимо точно определить положение лазерного источника излучения относительно видеокамер в условиях движения. Вследствие вибрации автомобиля при движении точность измерения такой системы со временем ухудшается. Пассивная и активная стереоскопические системы могут иметь простую структуру, а элементы этой системы хорошо фиксируются в рабочем положении. Пассивная стереоскопическая система состоит из двух видеокамер. Основной задачей стереоскопической системы является определение сопряженных точек в стереопаре. Решение этой задачи с использованием пассивной стереоскопической системы требует больших вычислительных ресурсов и времени, а величина погрешности определения координат сопряженных точек слишком велика. При добавлении сканирующего лазера в пассивную стереоскопическую систему она становится активной, и задача определения сопряженных точек в стереопаре решается заметно проще и с меньшей погрешностью.

После получения координат сопряженных точек в стереопаре возможно получение пространственных координат объектов в наблюдаемой сцене. Далее, применительно к задаче создания систем безопасности движения автомобиля, после проведения селекции объектов и определения их скоростей, возможно формирование сообщений или управляющих сигналов в случае опасности.

Целью диссертационного исследования является теоретическое и экспериментальное исследование активной стереоскопической оптико-электронной системы (АСОЭС) анализа пространства для транспортных средств, использующей цифровые методы обработки информационных сигналов, а также разработка методик получения трехмерного изображения объектов и выделения их из исследуемой сцены.

Для достижения указанной цели требовалось решить **ряд задач**:

1) Произвести анализ и классификацию современных датчиков в активных системах безопасности транспортных средств.

2) Разработать методику и алгоритм выделения тест-объекта и определения координат его контрольных точек для автоматической калибровки стереоскопической системы, исследовать погрешности калибровки стереоскопической системы в зависимости от количества кадров.

3) Произвести анализ погрешности АСОЭС в зависимости от длины стереобазы, и схемы расположения видеокамер АСОЭС при фиксированной погрешности определения сопряженных точек в стереопаре.

4) Произвести выбор схемы расположения камер АСОЭС, а также разработать методики габаритного расчета АСОЭС.

5) Разработать методики обработки изображения с целью получения трехмерного изображения в АСОЭС.

6) Разработать алгоритм выделения объектов в наблюдаемой сцене и алгоритм различения объектов друг от друга

Методы исследования. Диссертация выполнена на основе аналитических и численных методов геометрической оптики, а также базовых элементов теории оптико-электронных приборов. Экспериментальные исследования проведены методом имитационного компьютерного моделирования на основе пакета MATLAB и физического моделирования на разработанном стенде.

Научная новизна работы

1. Разработана методика выделения тест-объекта и определения координат контрольных точек для автоматической калибровки АСОЭС.

2. Разработана методика получения трехмерного изображения АСОЭС путем предварительного вычисления эпиполярных линий. Предложенная методика сокращает время получения трехмерного изображения и дает АСОЭС возможность работать в реальном времени.

3. Разработаны алгоритмы выделения объекта из облака точек, полученных АСОЭС. Предложенные алгоритмы анализируют градиент изменения высоты и расстояние между точками в облаке точек.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Методика автоматической калибровки стереоскопической системы, позволяющая уменьшить время калибровки и избежать ошибки оператора.

2. Результаты анализа погрешности измерения стереоскопической системы в зависимости от расположения камер в стереоскопической системе, позволяющие осуществить выбор схемы расположения видеокамер АСОЭС, и осуществить разработку методики габаритного расчета АСОЭС.

3. Методика получения трехмерного изображения АСОЭС, позволяющая быстро восстановить трехмерное изображение наблюдаемой сцены.

4. Алгоритм выделения объектов из облака точек, полученных АСОЭС, позволяющий определить препятствия и проездные части в облаке точек.

5. Алгоритм различения объектов друг от друга в облаке точек наблюдаемой сцены, позволяющий распознавать объекты, определить их габаритные параметры и параметры их движения.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что

1) На основе предложенной методики калибровки показано, что в соответствии с рекомендацией по выбору количества кадров, их число должно быть не менее 20.

2) Разработана компьютерная модель функционирования стереоскопической системы, позволившая определить погрешность измерения стереоскопической системы в зависимости от расположения

видеокамер при фиксированной погрешности определения координат сопряженных точек в стереопаре.

3) В результате проведенного анализа показано, что при исследовании одной и той же сцены с фиксированной шириной стереобазы и погрешностью определения координат сопряженных точек в стереопаре, конвергентный вид АСОЭС дает лучший результат по сравнению с нормальным и параллельным видами. Результат подтвержден на математической модели и имитационной компьютерной модели.

4) Предложена методика габаритного расчета параметров АСОЭС анализа пространства для транспортных средств, позволяющая рассчитывать поле зрения, фокусное расстояние оптической системы АСОЭС, угол между камерами и скорости работы камеры.

5) Показано, что предложенная методика восстановления трехмерного изображения при предварительном вычислении эпиполярных линий позволяют АСОЭС работать в реальном времени. Эффективность предложенной методики проверена на физической модели АСОЭС.

6) Предложен алгоритм выделения объектов из облака точек и различения объектов друг от друга в облаке точек объектов, которые позволяет эффективно селектировать объекты в реальном времени. Результат работы предложенной методики проверен на физической модели АСОЭС.

Практическая реализация результатов работы. Результаты работы отражены в отчете о НИР, проводимой коллективом Международной лаборатории "Техносферная безопасность" Университета ИТМО, а также использованы в учебном процессе кафедры оптико-электронных приборов и систем Университета ИТМО.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 6 конференциях: XI научной и учебно-

методической конференции СПбГУ ИТМО (Санкт-Петербург, Россия, 2011г.); VIII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых (Санкт-Петербург, Россия, 2011г.); II и III Всероссийских конгрессах молодых ученых (Санкт-Петербург, Россия, 2013 и 2014 г.); XI Международной конференции «Прикладная оптика-2014» (Санкт-Петербург, Россия, 2014г.); Международной научно-практической конференции «Сенсорика-2014» (Санкт-Петербург, Россия, 2014г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 статьи в изданиях из перечня ВАК, 2 — в трудах международных конференций.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 89 наименований. Общий объем работы составляет 123 страниц, включая 54 рисунка, 6 таблицу.

Диссертационная работа выполнена в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики.

1. Обзор систем безопасности движения автомобиля

1.1. Описание задачи контроля за состоянием дороги опто-электронной системой

Одной из основных проблем, связанных с автомобилизацией, является проблема безопасности дорожного движения. Эта проблема, в частности, включает в себя вопросы контроля состояния дороги и наличия препятствий на пути движения автомобиля. Безопасность движения автомобиля на раннем этапе обеспечивалась наличием устройств, которые информировали водителя о наличии препятствия на дороге. Позже по мере совершенствования технологии датчиков и информационных технологий, обеспечивающих транспортную безопасность, была предложена концепция полностью автоматической и автономной системы управления автомобилем, которая известна как автономный автомобиль.

1.2. Концепция автономного автомобиля и использование в ней опто-электронных систем

Первая демонстрация прототипа автономного автомобиля была осуществлена фирмой General Motors на Всемирной выставке 1939 года. Был представлен электрический автомобиль, который питался от встроенных аккумуляторов и управлялся по радио [3]. Этот автомобиль не являлся в полной мере автономным, но мог передвигаться при отсутствии водителя в его салоне.

В 1980-х годах инженер Ernst Dickmanns и его сотрудники разработали автономный автомобиль на основе одной из моделей Mercedes-Benz [2]. Скорость машины достигла до 96 км/ч на дороге при отсутствии других транспортных средств, что являлось очевидным недостатком. Однако демонстрация этой модели и последующее ее совершенствование позволили Европейской комиссии начать финансирование проекта по разработке автономных транспортных средств в размере 749 млн. евро (1987-1995).

В 1980-х годах в США появились проекты автономных автомобилей фонда DARPA на основе системы, включающей в себя лазерный лидар и систему технического зрения. Экспериментальные образцы таких автомобилей были способны передвигаться со скоростью до 30 км/ч [4]. В 1987 году лаборатория HRL (Hughes Research Labs) впервые продемонстрировала автономный автомобиль на основе сенсоров и встроенной карты местности [4]. Испытания такого автомобиля проводились на трассе длиной более 600 м. При этом трасса была проложена на сложном рельефе местности с крутыми поворотами, подъемами, спусками, оврагами, крупными камнями и растительностью.

В 1994 году были изготовлены два экспериментальных автономных автомобиля VaMP и Vita-2, которые проехали более 1000 км на трехполосном шоссе в окрестностях Парижа в режиме обычного интенсивного движения на скоростях до 130 км/ч. Однако эти автомобили имели водительское место и передвигались таким образом, что водитель мог вмешаться в управление в любой момент времени. Таким образом, эта система была полуавтономной, так как допускала в критических случаях вмешательство человека вследствие недостаточной надежности [5].

В 1995 году в лаборатории Carnegie Mellon University Navlab был создан автономный автомобиль, который проехал 5000 км через всю территорию США. Движение автомобиля контролировалось системой на основе нейронной сети. Однако и в этом случае тормозная система автомобиля контролировалась человеком [5].

В 2010 году автономный автомобиль VIAC, разработанный компанией VisLab, проехал 13000 км по выставке Shanghai Expo 2010, которая проводилась в КНР [6].

Вплоть до настоящего времени многие автомобильные компании разрабатывают и испытывают автономные автомобили собственной

разработки. Среди этих компаний такие известные производители как General Motors, Ford, Mercedes-Benz, Volkswagen, Audi, BMW, Volvo, Cadillac и многие другие.

В настоящее время наиболее известным и вместе с тем наиболее совершенным автономным автомобилем является автомобиль компании Google [7]. Далее будут рассмотрены технологии сенсоров, которые могут быть применены в автомобиле в качестве активной системы безопасности, такой как информационная измерительная система для автономного автомобиля.

1.3. Классификация системы анализа окружающей среды автомобиля

Основной задачей активной системы безопасности автомобиля, такой как система автономного управления автомобилем является исследование окружающей среды – обнаружение окружающих предметов, измерение их размеров, расстояния до них и принятия решения об их степени опасности для движущегося автомобиля. В настоящее время используются различные методы решения этой задачи. Классификация систем, использующих эти методы, показана на рисунке 1.1.

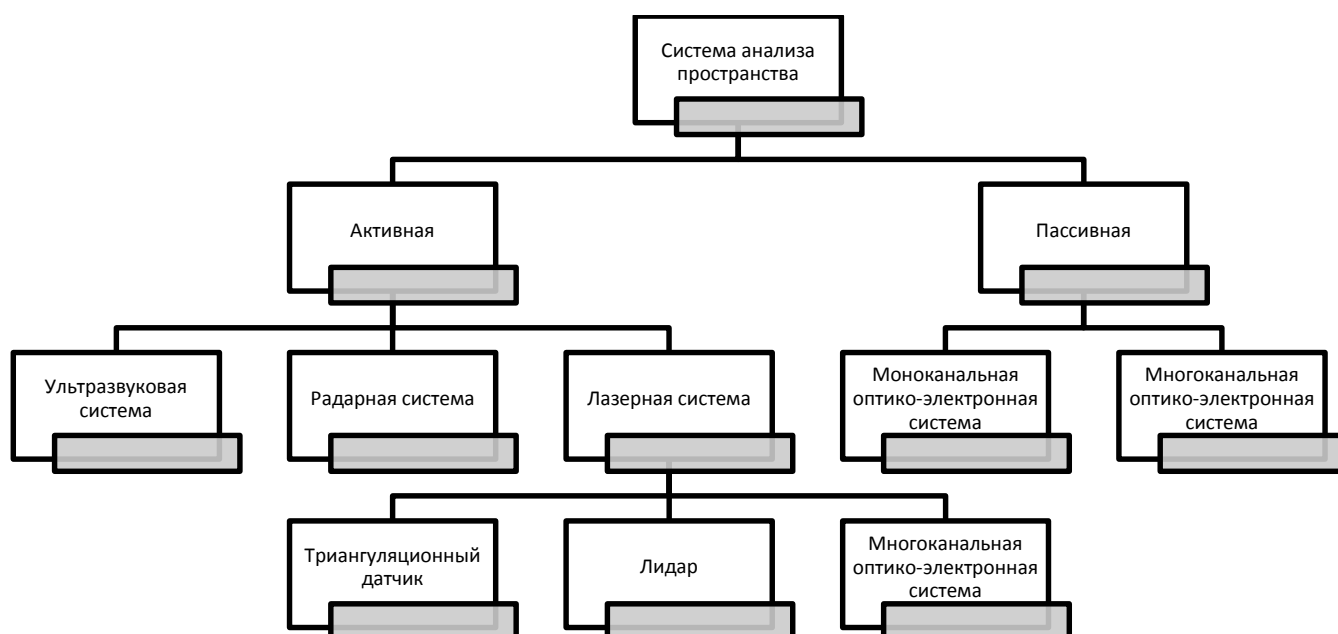


Рис. 1.1 Классификация систем анализа пространства

В данной работе рассматриваются все эти методы анализ пространства, их преимущества и недостатки, а также существующие системы, в которых эти методы применяются.

1.4.Активная система

1.4.1.Ультразвуковая система

Ультразвуковая система измеряет расстояния до объекта путем измерения время отражения звуковой волны от объекта. Частота звуковой волны находится в пределах частоты ультразвука, что обеспечивает сравнительно небольшой угол расхождения [9].

Ультразвуковая система может выдавать ложные сигналы в следующих случаях [8]:

- Наличие льда, снега или других загрязнений на датчике.
- Нахождение на дороге с неровной поверхностью, грунтовым покрытием, с уклоном.
- Движение по пересеченной местности.
- Наличие источников повышенного шума в пределах радиуса действия датчика.
- Работа в условиях сильного дождя или снегопада.
- Работа радиопередающих устройств в пределах радиуса действия датчика.
- Буксирование прицепа.
- Парковка в стесненных условиях (эффект эха).
- Система может не среагировать на следующие предметы:
- Острые или тонкие предметы, например, цепи, тросы, тонкие столбики.
- Предметы, поглощающие ультразвуковое излучение (одежда, пористые материалы, снег).
- Предметы высотой менее 1 метра.

- Объекты, отражающие звук в сторону от датчиков.

В настоящее время, ультразвуковая система применяется в большинстве автомобилей из-за малой себестоимости и простой структуры. Из-за своих недостатков, такая система не может быть использована как активная система безопасности автомобиля, работающая на больших дистанциях.

1.4.2.Радарная система

Радиолокационная станция (РЛС) или радар (англ. *radar* от *Radio Detection And Ranging* — радиообнаружение и измерение дальности) — система для обнаружения воздушных, морских и наземных объектов, а также для определения их дальности, скорости и геометрических параметров. РЛС использует метод, основанный на излучении радиоволн и регистрации их отражений от объектов [9].

Радиолокатор, в основном, служит для обнаружения целей, облучая их потоком электромагнитного излучения радиодиапазона и затем принимая отраженное излучение от цели. Поскольку скорость электромагнитных волн постоянна, становится возможным определить расстояние до цели, основываясь на измерении различных параметров распространения сигнала.

Чтобы измерить угловые координаты цели, радиолокационная станция определяет положение фронта волны сигнала, достигающего антенны, а также определяет направление, перпендикулярное фронту волны, которое характеризует угол прихода сигнала.

Расстояние до объекта можно определить по формуле [9]:

$$t_r = 2R/c,$$

Где t_r — время задержки принимаемого отраженного сигнала, c - скорость распространения света, R — дальность до цели.

Скорость объекта приблизительно находится по следующей формуле [10]:

$$f_d = 2f_i v_r / c,$$

где f_d – сдвиг частоты, f_i – частота зондирующего импульса, v_r – скорость цели.

В основе устройства РЛС лежат три компонента: передатчик, антенна и приёмник. Функционирование РЛС основано на различных методах модуляции сигнала и измерения отражённого сигнала: частотный метод, фазовый метод, импульсный метод [9]. В настоящее время в большинстве автомобилей в качестве системы безопасности применяется радарная система.

Радарная система безопасности автомобиля имеет следующие основные преимущества:








- быстроедействие,
- большая дальность измерения,
- возможность работы при наличии дождя, снега, тумана.

Их недостатком является невысокое разрешение, т.е. невозможно определить малые объекты.

Теперь мы рассмотрим некоторые радарные системы и их характеристики, которые нашли применение в существующих серийных автомобилях.

Существующие на рынке радарные системы приведены в таблице 1.1 [11].

Таблица 1.1

Компания	Fujitsu ten	ADC	Delphi	Bosch	Honda elesys	Denso	Hitachi
Вид							
Размер (мм)	89x107x 86	136x133x 68	137x67x1 00	91x124x 79	123x98x 79	77x107x 53	80x108x 64
Метод модуляции	FM CW	FM Pulse	FM CW	-	FM CW	FM CW	2- frequenc y CW
Дистанция (м)	4-120	1-150	1-150	2-120	4-100	2-150	1-150
Горизонтальный угол обнаружения (град.)	±8	±5	±5	±4	±8	±10	±8
Метод обнаружения угол	Mechani cal scan	Beam conversio n	Mechanic al scan	Beam conversi on	Beam conversi on	Phased array	Monopul se
КВЧ устройство	MMIC	GUNN	GUNN	GUNN	MMIC	MMIC	MMIC

Некоторые активные системы безопасности автомобиля, которые используют радарные датчики:

Система Mercedes Pre-safe Brake [12]

Система PRE-SAFE® Brake — автономная система аварийного торможения, которая дополнительно использует датчики радара, способствующие идентификации критических ситуаций. На скорости в диапазоне от 30 до 200 км/ч участок длиной примерно 200м перед автомобилем сканируется радаром на наличие отраженного сигнала от возможных препятствий. Водитель получает предупреждение о

потенциальной опасности примерно за две с половиной секунды до столкновения. Если на этой стадии водитель нажимает на тормоз, автомобиль автоматически передает тормозное усилие, необходимое для того, чтобы благополучно остановить автомобиль (если это физически возможно) независимо от того, какие усилия приложил водитель. Однако, если критическая ситуация продолжает развиваться, и водитель никак на нее не реагирует, примерно за полторы секунды до предполагаемого столкновения автомобиль предпринимает частичное торможение; в ожидании удара также срабатывает натяжение ремней безопасности. Эта система фактически состоит из двух РЛС, которая использует два диапазона длин волн. Одна из РЛС имеет дальность действия 30м, а вторая дополнительная РЛС - дальность до 200м. На Рис. 1.2 показаны схемы расположения всех датчиков автомобиля марки Mercedes-Benz.

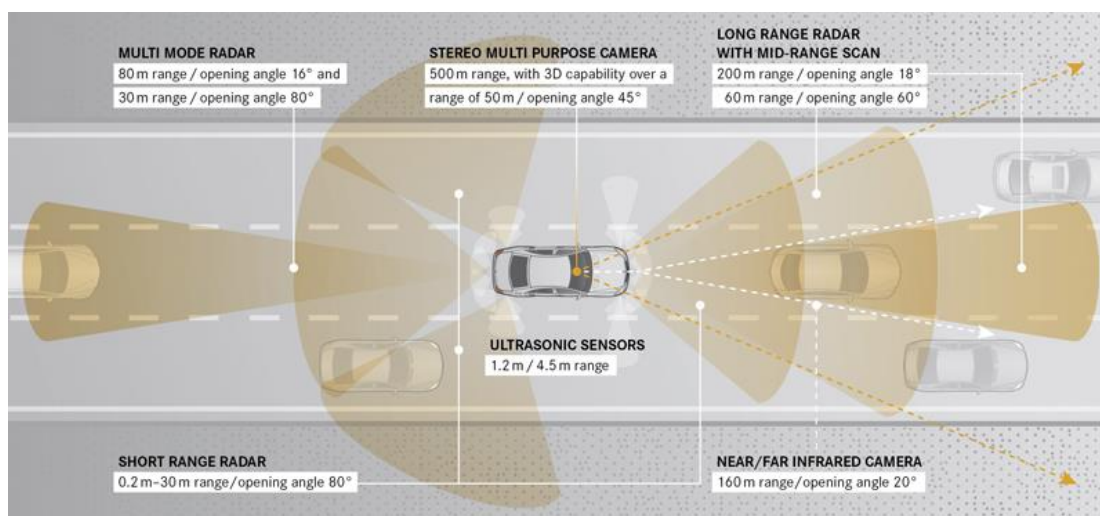


Рис. 1.2 Активная система безопасности на автомобиле марки Mercedes-Benz

Активная система безопасности автомобиля компании Nissan [13]

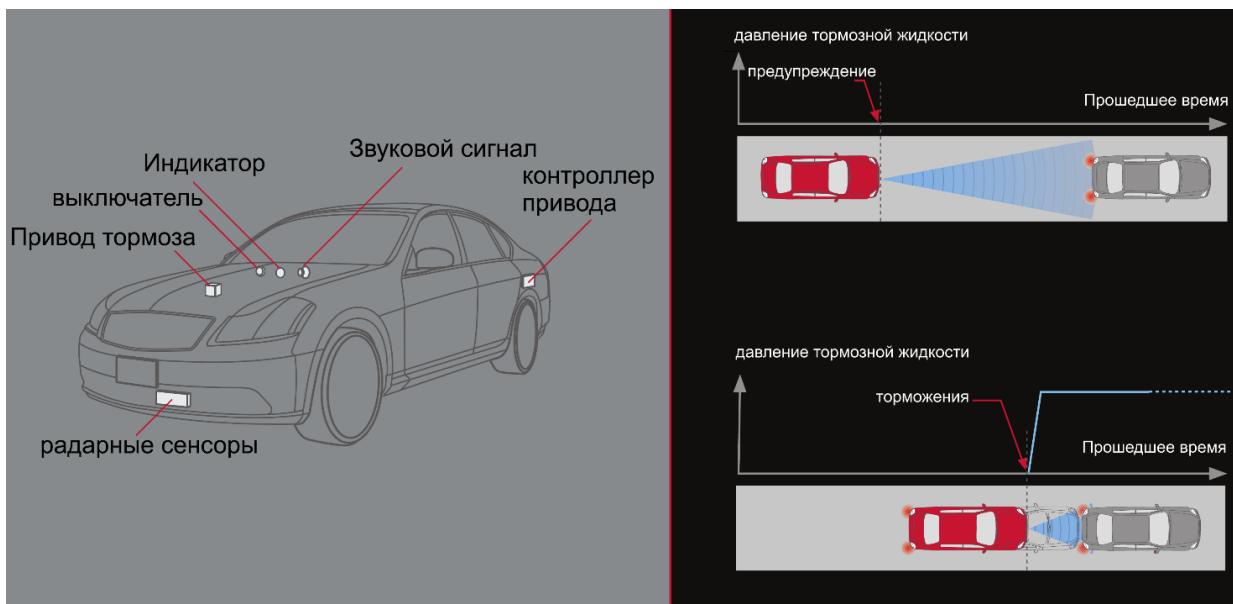


Рис. 1.3 Активная система безопасности на автомобиле марки Nissan

На Рис. 1.3 показана активная система безопасности автомобиля компании Nissan. Построенная на использовании радара, эта система измеряет расстояние от транспортного средства, а затем и подает звуковой сигнал и визуальное предупреждение, если она установит, что водитель должен принять меры, чтобы помочь избежать прямого наезда сзади. Кроме того, если система определяет, что столкновение неизбежно, даже после действия водителя, производится торможение для замедления транспортного средства, что позволяет уменьшить повреждения и уменьшить ущерб.

Автономный автомобиль компании Google [14]

В автономном автомобиле Google радарная система используется для анализа окружающей среды вне зоны действия лазерной системы. Составные элементы системы показаны на Рис.1.4.

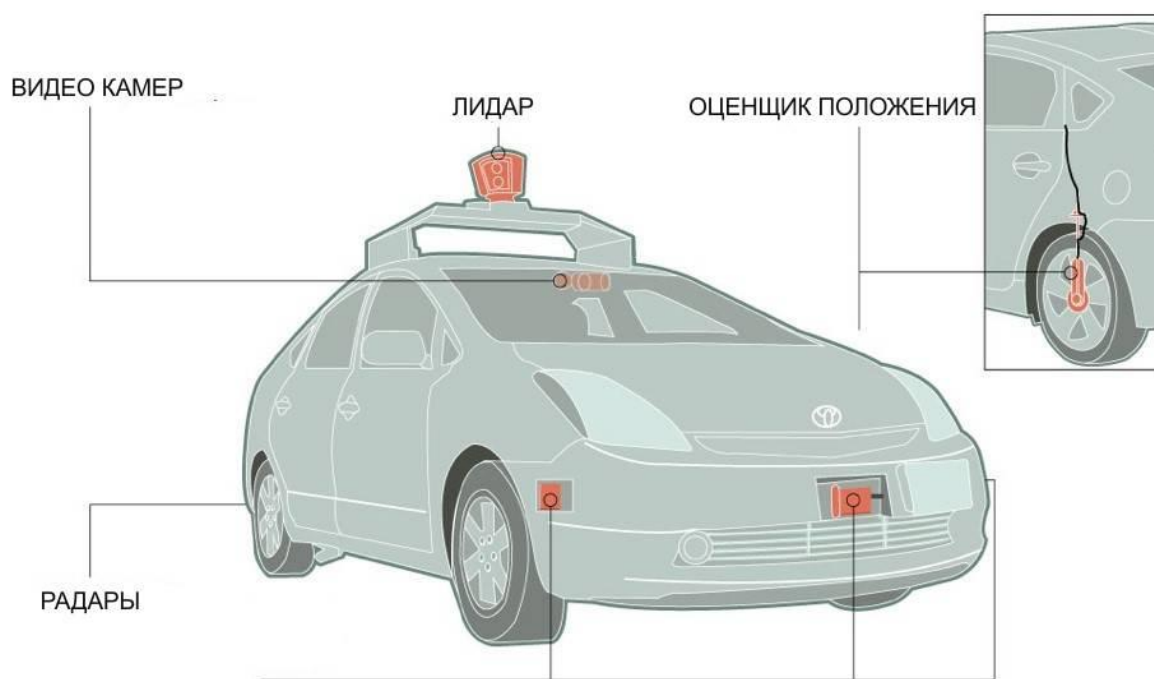


Рис. 1.4 Схема расположения датчиков автономного автомобиля компании Google

1.4.3. Лазерная система

1.4.3.1. Лазерный дальномер

Похожая на радиолокацию, лазерная локация осуществляется облучением наблюдаемого объекта лазерным излучением и приемом отраженного от этого объекта излучения. Техническими средствами лазерной локации является дальномер [15]. Наиболее распространенный тип лазерного дальномера работает по методу определения времени распространения лазерного луча, который имеет малый угол расхождения и направлен на исследуемый объект и времени распространения излучения, отраженного от объекта. Вследствие высокой скорости света этот метод не подходит для высокоточных измерений, где чаще используются триангуляционный и другие методы.

В общем случае задача определения расстояния до наблюдаемого объекта дальномера сводится к измерению соответствующего интервала

времени пролета лазерного импульса с дальномера до объекта и обратно. Различают три метода измерения дальности в зависимости от того, какой характер модуляции лазерного излучения используется в дальномере: импульсный, фазовый или фазово-импульсный.

Сущность метода импульсного измерения дальности состоит в том, что в направлении объекта посылается зондирующий импульс, который одновременно запускает счетчик времени в дальномере. Когда отраженный объектом импульс приходит к дальномеру, то он останавливает работу счетчика. При использовании тактового генератора для измерителя временных интервалов с частотой 150...300 МГц погрешность, вызванная дискретностью, составит 0,1...0,2 м [16].

Лазерные фазовые дальномеры в отличие от рассмотренных выше импульсных дальномеров обладают существенно меньшей дальностью измерения, но при этом гораздо большей точностью измерений. Такие различия объясняются тем, что в качестве источника излучения в лазерных фазовых дальномерах используется непрерывный полупроводниковый лазер, излучение которого промодулировано одним или несколькими гармоническими сигналами. При фазовом методе измерения дальности лазерное излучение модулируется по синусоидальному закону. В зависимости от дальности до объекта изменяется фаза сигнала, падающего на объект. При использовании высокой точности измерения фазы (0,1 град.) и низкой частоты модуляции (80 МГц) лазерного сигнала, погрешность измерения составляет 0,3...0,5 мм [17].

Схема лазерного дальномера

Схема импульсного лазерного дальномера включает в себя два независимых канала – канал излучателя и канал приемника. Канал излучателя содержит источник излучения – лазер, и формирователь выходного пучка лазера – телескоп [18]. При выборе требуемой величины

расходимости обычно принимают в расчет следующие соображения. Желательно иметь на максимальном измеряемом расстоянии размер светового пятна равный размерам мишени. Стоит обратить внимание и на то, что вся оптика дальномера должна просветляться для уменьшения потерь излучения. Что касается приемного канала, то просветление важно и с точки зрения повышения отношения сигнал/шум. В системе должен присутствовать узкий спектральный фильтр, выделяющий излучение с длиной волны используемого лазера.

Метод трехмерного лазерного сканирования

Трехмерное лазерное сканирование является новым, быстро развивающимся методом лазерных измерений, используемых для решения различных производственных и инженерных задач (проектирование, реконструкция, строительство, исследование окружающего пространства и т.д.).

В основе метода лазерного сканирования лежит определение координат отдельных регистрируемых точек на поверхности измеряемого объекта по трем измерениям (X , Y и Z), которое выполняются с помощью высокоточного скоростного (десятки тысяч измерений в секунду) лазерного дальномера. После измерения координат отдельной фиксированной точки на поверхности объекта лазерный пучок разворачивается на некоторый заданный угол для того, чтобы перейти на следующий узел координатной сетки, где вновь производится определение координат. Так продолжается до тех пор, пока не будет просканирована вся поверхность изучаемого объекта [19]. Координаты отдельных точек, полученные в результате сканирования объекта, объединяются в группы, называемые облаками точек. Количество точек в облаке варьируется от нескольких сотен до сотен тысяч (а порой и миллионов).

Первые приборы, работающие по такому принципу, появились в конце 1980-х - начале 1990-х годов. Одним из мировых лидеров по производству

коммерческих лазерных сканеров сегодня является американская компания Leica Geosystems [19].

Работа большинства лазерных сканеров основана на использовании импульсных лазерных дальномеров. Сканирование лазерным пучком осуществляется шаговыми электромоторами с закрепленными на них зеркалами. Одно из зеркал отклоняет луч лазера в горизонтальном направлении, а другое - в вертикальной плоскости (см. рис. 1.5).

Однако в последнее время используется и другая система сканирования. В этой системе луч лазера в горизонтальном направлении отклоняется не зеркалом, а с помощью ступенчатого (шагового) вращения сканера вокруг собственной оси. Это позволяет осуществлять съемку всего окружающего сканер пространства. Так, например, в лазерном сканере Leica HDS3000 поле зрения составляет 360° по горизонтали и 270° по вертикали.

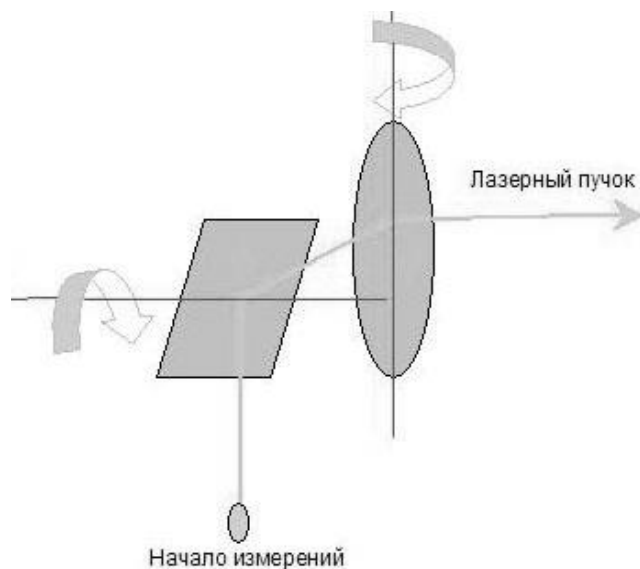


Рис. 1.3-координатное сканирование лазерным лучом

Естественно, что после завершения процесса съемки возникает необходимость приведения отснятого материала в некую единую систему координат. С этой целью во время съемки на объекте или рядом с ним устанавливаются специальные марки, с помощью которых производится

объединение облаков точек, полученных с мест различных стоянок сканера, при помощи специального программного обеспечения.

Выше отчасти уже был затронут вопрос об обработке данных лазерного сканирования, когда речь шла о регистрации отдельных облаков точек в единой системе координат. Однако технология обработки не ограничивается одной лишь регистрацией. После окончания сканирования получается огромный массив точек, детально описывающий объект съемки. По сути дела, мы получаем его точечную трехмерную модель, отражающую все детали объекта.

Следующий этап работы - это извлечение из полученного набора данных той информации, которая ведет к получению конечного результата измерений. Этим результатом может быть, например, получение изображения сечения объекта в заданной плоскости или составление его трехмерной модели. Кроме того, можно измерить расстояния между такими точками исследуемого объекта, куда невозможно или даже опасно посылать человека с рулеткой.

Следует отметить, что в процессе съемочных работ могут получаться гигантские (состоящие из десятков миллионов точек) массивы данных, которые требуют использования огромных (до нескольких гигабайт) объемов памяти на жестких дисках персональных компьютеров. По этой причине при лазерном сканировании предъявляются очень высокие требования к быстродействию и емкости компьютерных накопителей информации. [20]

Теперь мы рассмотрим существующие лазерные дальномеры, используемые в автомобиле в качестве системы активной безопасности, а также как системы анализа обстановки окружающей среды при управлении автомобилем.

Лидар RIEGL LMS-Q120ii [21]



Рис. 1.6 Лидар RIEGL LMS-Q120ii

- Дальность: 120м
- Точность: 20мм
- Угол поля зрения: 80 градусов
- Скорость измерения: 10000 изм/сек.

Лидар HDL-64E S2 [22]



Рис. 1.7 Лидар HDL-64E S2

- Дальность 120м
- Точность <20мм
- Горизонтальное поле зрения 360 градусов
- Вертикальное поле зрения 26.8 градусов
- Скорость измерения >1.3 млн. Точек / сек

Лидар HDL-32E [23]



Рис.1.8 Лидар 1.8 HDL-32E

- Горизонтальное поле зрения 360 градусов
- Вертикальное поле зрения +10.67 до -30.67 градусов
- Скорость измерения: 700000 точек/сек
- Точность: <20мм
- Дальность измерения: 70м

Лидар серии LD-LRS1000 до 5100 [24]



Рис. 1.9 LD-LRS

- Дальность до 250м
- Поле зрения от 300 до 360 градусов
- Угловое разрешение 0.125 градусов

Лидар Sick LSM-291 [25]



Рис. 1.10 Лидар Sick LSM-291

- Горизонтальное поле зрения 180 градусов
- Точность: 10мм
- Дальность измерения: 80м

Continental ISF 172 Lidar [26]

- Горизонтальное поле зрения 140 градусов
- Вертикальное поле зрения 4 градусов
- Дальность измерения: 150м

IBEO Alasca XT Lidar [26]

- Горизонтальное поле зрения 240 градусов
- Угловое разрешение 3.2 градусов
- Дальность измерения: 200м

Эти лидары применяются в следующих автономных автомобилях:

- Tartan Racing - 2007 Chevrolet Tahoe со скоростью 22.5км/ч [26]
- Stanford Racing - 2006 Volkswagen Passat Wagon со скоростью 22.05км/ч [26]
- Victor Tango - 2005 Ford Hybrid Escape со скоростью 20.9км/ч [26]

- Google автономный автомобиль –Toyota Prius, который проехал более 200000км без аварии в 2012 году и получил водительское право в 3 штатах США [7].

Лазерный дальномер имеет все необходимые характеристики для применения в качестве активной системы безопасности автомобиля, такие как высокая точность измерения, быстродействие, большая дальность измерения. В настоящее время цена лазерного дальномера слишком высока, до 60.000\$ или больше, из-за чего она не может широко применяться.

1.4.3.2.Триангуляционный метод

Триангуляционный метод измерения – это перспективный и широко применяемый подход к решению важных измерительных задач в разных областях науки [27]. Оптическая лазерная триангуляция – один из самых точных и быстрых способов получения цифровых трехмерных моделей реальных объектов [28,29]. Метод основан на определении координат изображения отраженного лазерного луча на фоточувствительной площадке матричного фотоприемника.

Принцип действия лазерного триангуляционного датчика: источник лазерного излучения под определенным углом освещает объект лазерным лучом. Изображение объекта с лазерным лучом на его поверхности регистрируется цифровой видеокамерой. Путем определения положения лазерного луча на изображении вычисляются трехмерные координаты точек его поверхности, на которых присутствует лазерный луч. Сканирование всего объекта возможно путем смещения лазерного луча вдоль всей поверхности объекта.

Триангуляционную схему (рис. 1.11) условно можно разделить на три части: канал излучателя (или канал осветителя), контролируемая поверхность, приёмный канал.

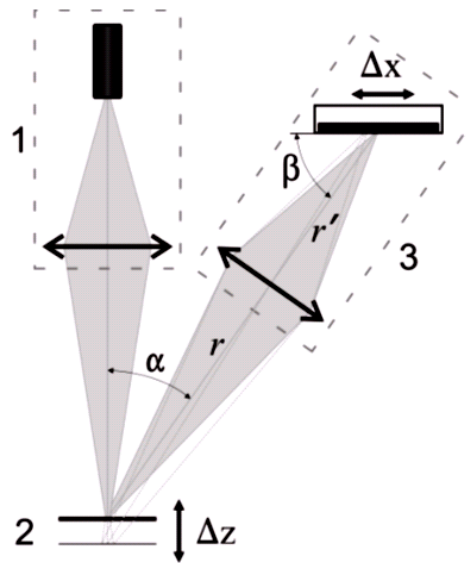


Рис. 1.11. Принципиальная схема триангуляционного измерителя: 1 - канал излучателя, 2 - контролируемая поверхность, 3 - приёмный канал

Первая часть схемы – канал излучателя, который состоит из источника излучения и объектива, который формирует зондирующий пучок на контролируемой поверхности. В качестве источника излучения, как правило, используется лазерный диод. Распределение света, создаваемое такими источниками, имеет гауссов вид (рис. 1.12, а). Шириной d зондирующего пучка называется расстояние между точками профиля интенсивности на уровне I_{\max}/e , где I_{\max} – максимальная интенсивность в поперечном сечении. Перетяжкой гауссового пучка называется минимальная ширина пучка вдоль направления распространения. На рисунке 1.12, б перетяжка расположена в плоскости А. Очевидно, в этой плоскости интенсивность зондирующего пучка достигает максимального значения.

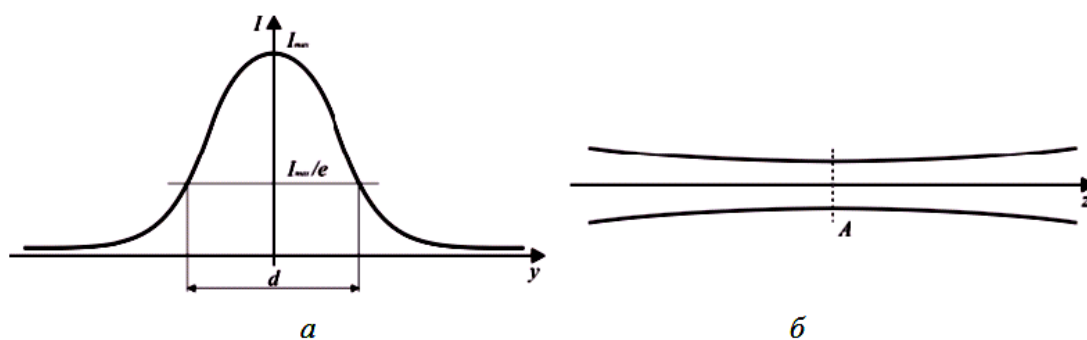


Рис. 1.12. а - распределение Гаусса (I – интенсивность, y – направление перпендикулярное распространению излучения), б - гауссов пучок в продольном разрезе (z – направление распространения излучения)

Вторая неотъемлемая часть триангуляционной измерительной схемы - это контролируемая поверхность. Задача триангуляционного датчика - измерить расстояние от выбранной точки на оси зондирующего пучка до физической точки поверхности с высокой точностью. Любая контролируемая поверхность характеризуется неровностью или степенью своей гладкости – шероховатостью Rz . Как правило, требуемая точность измерения обратно пропорциональна шероховатости контролируемой поверхности. Каждая поверхность имеет также свойство отражать или рассеивать падающее излучение. Рассеяние излучения поверхностью контролируемого объекта используется в триангуляции как физическая основа для получения информации о расстоянии до этой поверхности. Поэтому, контролируемая поверхность является неотъемлемой частью триангуляционной измерительной схемы.

Третья часть схемы триангуляционного измерителя – приемный канал, который состоит из проецирующего объектива и фотоприемника. Проецирующий объектив формирует изображение зондирующего пятна в плоскости фотоприемника. Чем больше диаметр D объектива, тем выше его светосила. Иначе говоря, тем интенсивнее и качественнее строится изображение пятна. В зависимости от конкретной реализации, для регистрации сформированного изображения в качестве приемника

используют матричный фотоприемник, фотодиодную линейку или позиционно-чувствительный приемник. Схема триангуляционного измерителя, приведенная на рисунке 1.11, работает следующим образом. Канал излучателя 1 формирует изображение светового пятна на контролируемой поверхности 2. Далее рассеянный контролируемой поверхностью свет попадает в приемный канал 3. Таким образом, в плоскости фотоприемника создается изображение освещенного участка контролируемой поверхности (световое пятно). При смещении контролируемой поверхности на величину Δz (рис. 1.11), световое пятно в плоскости фотоприемника смещается на величину Δx . Зависимость смещения контролируемой поверхности Δz от смещения светового пятна в плоскости фотоприемника Δx , имеет следующий вид:

$$\Delta z = \frac{r \cdot \sin \varphi}{\sin(\alpha - \varphi)},$$

Где $\varphi = \arctg(A \cdot \Delta x / (1 + B \cdot \Delta x))$, $A = \sin \beta / r'$, $B = -\cos \beta / r'$,

r , r' - это расстояния от контролируемой поверхности 2 до проецирующего объектива приемного канала 3, и от проецирующего объектива до фотоприемника, притом, что контролируемая поверхность находится в центре диапазона измерений смещений [30,31,32].

На сегодняшний день дальность действия триангуляционных лазерных сканеров составляет от десятков сантиметров до 25м. Точность получения пространственных координат точек объекта триангуляционными сканерами составляет от 50мкм до 0,3мм и в основном зависит от величины измеряемого расстояния [33].

В таблице 2 приводятся диапазон измерений и величина погрешности измерения некоторых лазерных триангуляционных датчиков.

Таблица 1.2

Название	Диапазон измерения	Разрешение
РФ603 [34]	4-1250мм	0.01% диапазона
РФ600 [35]	10-2500мм	0.02% диапазона
РФ605 [36]	50-500мм	0.02% диапазона
РФ620HS – компактная версия [37]	7-65мм	0.1%-0.15% диапазона
РФ620HS – стандартная версия [37]	35-250мм	0.1%-0.15% диапазона
РФ620HS – специальная версия [37]	20-1450мм	0.1%-0.15% диапазона

Как показано в таблице, точность измерения этих приборов очень высока, но их рабочий диапазон сравнительно небольшой. Вследствие этого триангуляционный метод в настоящее время не применяется в автомобилях.

Преимущество и недостатки лазерного сканера

У лазерного дальномера и лазерного триангуляционного датчика есть сильные и слабые стороны, что делает их пригодными для работы в различных ситуациях. Преимущество лазерных дальномеров заключается в том, что они способны работать на очень больших расстояниях, порядка километра. Эти дальномеры, таким образом, подходят для сканирования больших структур, таких как здания или географические объекты. Точность лазерного дальномера порядка одного миллиметра. Триангуляционные датчики наоборот имеют ограниченный диапазон работы - до нескольких метров, но их точность значительно выше – порядка нескольких десятков микрометров.

Точность лазерного дальномера может быть потеряна в случае, когда лазерный импульс попадает в край объекта и информация, которая передается обратно в сканер от двух разных поверхностей, засвеченных одним лазерным импульсом, дает неверный результат. Координата, вычисленная относительно положений сканера и точек, которые попали в край объекта, будет рассчитана на основании средней и, следовательно, точка будет установлена в неправильном месте. При использовании сканера с высоким разрешением, возможно увеличение количества отсчетов, которые попадут на край объекта, что будет увеличивать ошибку при измерении положения края объекта. Сканеры с меньшей шириной пучка могут решить эту проблему, но будет ограничен диапазон измерения и ширина пучка увеличится по мере увеличения расстояния до объектов. Программное обеспечение также может помочь в определении правильного отраженного импульса света.

При скорости сканирования до 10000 точек в секунду, сканирование с низким разрешением может занять время менее чем одна секунда. Высококачественный сканер требует миллионов отсчетов, и процесс

получения результата может занять несколько минут. Из-за малой скорости работы высококачественного сканера может появиться искажение результата вследствие возможного перемещения измеряемых объектов сцены. Таким образом, необходимо установить объект и сканер на стабильной платформе и минимизировать вибрацию. С помощью высококачественного сканера сканирование объектов в движении выполнить очень сложно.

В последнее время проводятся исследования по компенсации искажений вследствие небольшой вибрации.

При сканировании в одном положении в течение длительного времени небольшое изменение положения сканера может происходить в связи с изменениями температуры, например, неравномерного нагрева измерительной установки солнечным светом. Некоторые лазерные сканеры имеют встроенные компенсаторы, которые противодействуют различным факторам, связанным с движением сканера в процессе сканирования.

В настоящее время, стоимость лазерного дальномера довольно высока для применения в автомобиле в качестве системы безопасности.

1.5.Пассивная система

В настоящее время, видеочамера применяется в автомобиле в качестве вспомогательной системы для водителя, такой как система определения полосы движения, система определения дорожных знаков, и система определения сигналов светофора [38,39,40]. Простая видеочамера без дополнительных функций не может точно определить размер объектов на дороге и расстояние до них, поэтому она не может использоваться как активная система безопасности автомобиля. Поэтому в данном разделе мы рассмотрим только оптико-электронные пассивные системы, которые могут получить информацию о размерах и положениях объектов на дороге.

1.5.1. Моноканальная оптико-электронная система

1.5.1.1. Движущаяся камера

Метод восстановления трехмерного изображения окружающей среды использует одну движущуюся камеру. На камере установлены гироскопы и акселерометры для определения ее угловой ориентации и ускорения. С учетом угловой ориентации и ускорения камеры можно определить положение камеры в момент регистрации изображения сцены [41,42,43].

Движение камеры описывается следующей формулой [44]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} c_f \\ \dot{c}_f \\ q_{sf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{c}_f \\ \overline{q_{sf}} a_s q_{sf} + g_f \\ \omega_s q_{sf} \end{bmatrix},$$

Где: c_f – положение камеры, \dot{c}_f – скорость камеры, q_{sf} – ориентация камеры, a_s – ускорение, ω_s – угловая скорость. Значение a_s и ω_s получены с датчиков, установленных на камере.

Из множества изображений, полученных при разных положениях камеры, мы можем определить положение объекта в пространстве.

В настоящее время этот метод находится в процессе изучения и разработки алгоритмов. На сегодняшний день нет точного алгоритма, позволяющего определить положение сопряженных точек из множества изображений сцены.

Основным достоинством этого метода является простая и недорогая схема построения системы.

Основной недостаток метода – несовершенный алгоритм обработки информации и малое быстродействие системы вследствие необходимости механического движения камеры.

1.5.1.2. Одна камера с разделенным оптическим каналом

Схема одной камеры с разделенным оптическим каналом показана на рис. 1.13 [45].

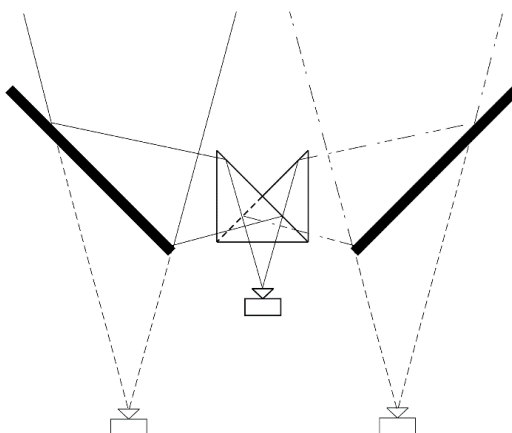


Рис. 1.13 Схема одной камеры с разделенным оптическим каналом

Регистрирующее устройство в этой системе - одна видеокамера. Перед видеокамерой устанавливается оптическая система для разделения изображений. Эта система состоит из призмы и двух зеркал. Расстояние между центрами зеркал соответствует величине стереобазы стереоскопической системы, которая регистрирует стереопару с использованием одной камеры. При этом фокальная плоскость камеры делится на две части и в каждой из них размещается изображение одного из каналов стереопары. Перед работой, необходимо откалибровать систему, чтобы определить ее внутренние и внешние параметры [46,47,48,49].



Рис. 1.14 Изображение наблюдаемой сцены

1.5.2. Многоканальная оптико-электронная система: стереоскопический метод

Стереоскопические системы обычно используют две видеокамеры, разнесенные на величину стереобазы. При анализе изображений стереопары можно определить трехмерные координаты в каждой точке изображения. Этот метод основан на тех же принципах, которые являются основой стереоскопического зрения человека.

Рассмотрим ситуацию, при которой две видеокамеры, находящиеся в разных точках, регистрируют одну и ту же сцену [50]. Пара изображений, получаемых при этом, называется стереопарой. Рассмотрим простейший случай. Стереоскопическая система состоит из двух одинаковых видеокамер с фокусным расстоянием оптической системы f . Обе камеры системы расположены так, что их оптические оси параллельны, а прямая, проходящая через оптические центры, перпендикулярна оптическим осям (эта прямая называется базовой линией, а ее отрезок, заключенный между оптическими центрами – стереобазой b). Общая система координат, начало которой расположено на базовой линии посередине между оптическими центрами камер имеет ось OZ , которая параллельна оптическим осям, а ось OX направлена вдоль базовой линии (рис. 1.15). Начала координат в плоскостях изображений видеокамер совпадают с главными точками ($u_0=v_0=0$), а единицы измерения координат в общей системе и в плоскостях изображения камер одинаковы ($w=h=1$).

Пространственная точка M имеет координаты (X, Y, Z) в общей системе координат. Координаты ее проекции в плоскости изображения левой (первой) видеокамеры обозначим через (x', y') ; а в плоскости изображения правой (второй) видеокамеры – через (x'', y'') . Проекции точки M в плоскостях изображений разных видеокамер называются сопряженными точками. Координаты изображений точки M в плоскостях изображений видеокамер определяются следующим образом:

$$x' = \frac{f(x + \frac{b}{2})}{z}, x'' = \frac{f(x - \frac{b}{2})}{z}, y' = y'' = fY/Z.$$

Из вышеуказанных соотношений, при известных координатах изображений точки М в плоскостях изображений видеокамер, можно определить пространственные координаты точки М:

$$Z = fb/(x' - x'') \quad (1.1)$$

$$X = \frac{b(x' + x'')}{2x' - 2x''}, Y = \frac{b(y' + y'')}{2x' - 2x''} \quad (1.2)$$

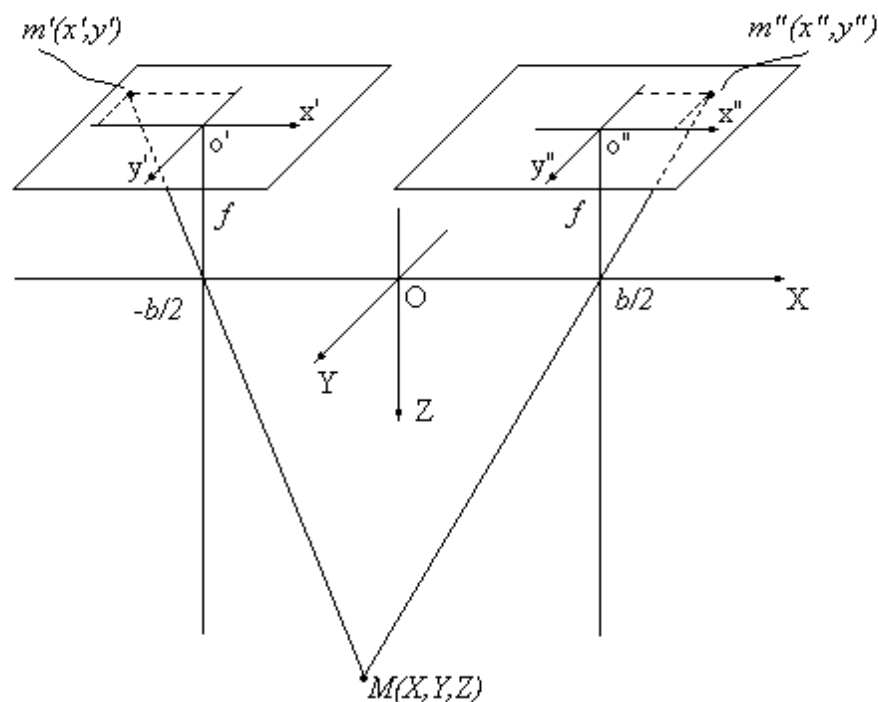


Рис.1.15 Простейшая стереоскопическая система

Разность $d = x' - x''$ называется диспаратностью. Из соотношений (1.1) и (1.2) следует, что ошибки в координатах проекций сильнее сказываются при малой диспаратности и, следовательно, расстояния до далеких объектов измеряются менее точно, чем до близких. С другой стороны, при фиксированной дальности диспаратность пропорциональна размеру базы, следовательно, точность измерений повышается с увеличением базы.

Теперь рассмотрим общий случай, когда две видеокамеры стереоскопической системы расположены произвольно друг другу (рис.1.16). Пусть первой камере соответствует система координат $O'X'Y'Z'$, а второй – $O''X''Y''Z''$ (рис. 1.16). Координаты точки M в системе координат первой видеокамеры определяются вектором $M'=(X',Y',Z')^T$, а в системе координат второй видеокамеры – вектором $M''=(X'',Y'',Z'')^T$. Переход от общей системы координат к системам координат первой и второй камер осуществляется с помощью преобразований $M'=R'M+t'$, $M''=R''M+t''$ соответственно. Учитывая это, легко показать, что связь между векторами M' и M'' задается соотношением:

$$M'' = RM' + t;$$

Где $R=R''R'^T$ - ортогональная матрица, описывающая ориентацию системы координат второй камеры относительно первой, а $t=-R''R'^Tt'+t''$ - вектор трансляции, определяющий положение оптического центра второй камеры в системе координат первой. Матрицу R и вектор t принято называть внешними параметрами системы регистрации.

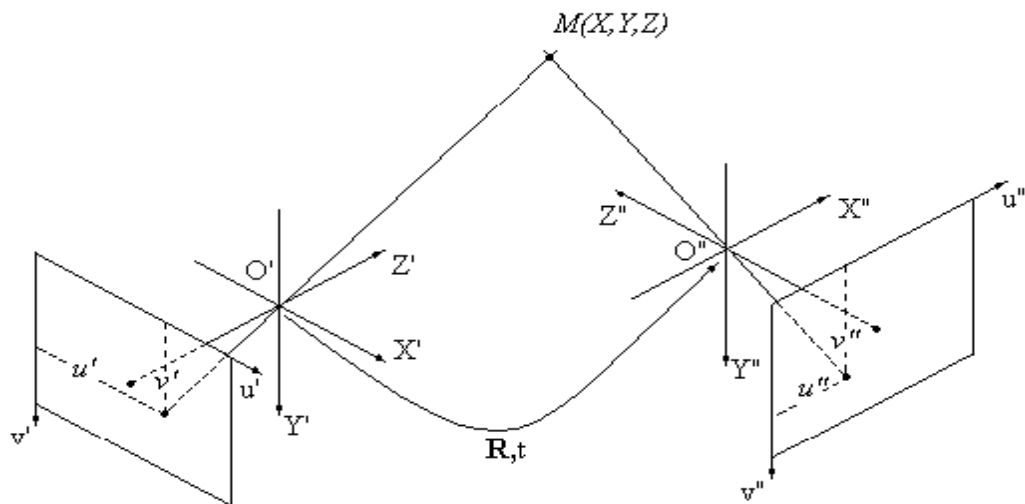


Рис.1.16 Система двух произвольно ориентированных камер

Внутренние параметры первой и второй камер описываются матрицами A_1 и A_2 соответственно. Координаты изображения точки M в плоскости изображения первой видеокамеры описываются вектором v' , и в плоскости изображения второй видеокамеры – вектором v'' . При известных параметрах стереоскопической системы и координатах изображений точки M в стереопаре, можно определить пространственные координаты точки M следующим образом:

$$\begin{bmatrix} Z' \\ Z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v'^T A_1^{-T} A_1^{-1} v' & -v'^T A_1^{-T} R^T A_2^{-1} v'' \\ -v'^T A_1^{-T} R^T A_2^{-1} v'' & v''^T A_2^{-T} A_2^{-1} v'' \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -v'^T A_1^{-T} R^T \\ v''^T A_2^{-T} \end{bmatrix} t,$$

$$M' = Z' A_1^{-1} v', M'' = Z'' A_2^{-1} v''.$$

Из всего изложенного выше следует, что для оценивания трехмерных координат некоторой точки по стереопаре необходимо: а) знать внутренние параметры видеокамер и внешние параметры стереоскопической системы (задача калибровки), б) найти и определить на изображениях координаты соответствующих данной точке сопряженных точек (задача поиска сопряженных точек).

Центральной проблемой компьютерного стерео-зрения является поиск сопряженных точек. Задача автоматизированного поиска сопряженных точек состоит в следующем: на одном из изображений выбрана точка m' , являющаяся проекцией некоторой точки M трехмерного пространства, и при этом необходимо на втором изображении найти точку m'' – проекцию той же точки.

Для любой стереоскопической системы, для выбранной точки m' на изображении первой камеры, ее сопряженная точка m'' в изображении второго камеры всегда находится на одной определенной линии. Эта линия называется эпиполярной линией (рис.1.17). Функция этой линии определяется следующим образом:

$$a'^T v'' = 0,$$

где вектор коэффициентов $a'' = Fv'$, $F = A_2^{-T} [t]_x RA_1^{-1}$.

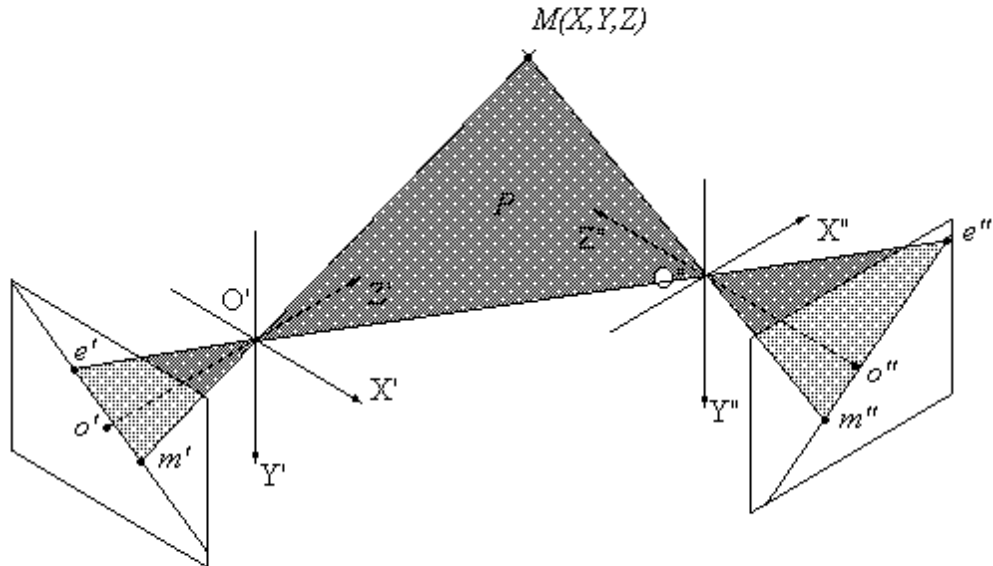


Рис.1.17 Эпиполярные линии

Для решения задачи поиска сопряженных точек в стереопаре в настоящее время существует много методов. Их можно подразделить на глобальные методы и локальные методы [51,52,53,54,55,56,57,58]. Существующие методы имеют ограниченную точность определения координат сопряженных точек, и они требуют много времени и ресурсов.

По сравнению с активными системами анализа пространства, пассивные системы имеют более простую структуру построения и не требуют высокоточных элементов, следовательно, цена таких систем много меньше чем активных систем. Недостатком пассивной системы является несовершенный метод вычисления трехмерных координат точек в пространстве.

1.6. Выводы по главе 1

В данном разделе рассмотрены системы, предназначенные для анализа окружающей среды в целях их применения в качестве активной системы безопасности автомобиля. У каждой системы есть свои достоинства и недостатки. Некоторые системы уже применяются в автомобилях, такие как ультразвуковые датчики, радарные системы, лазерные дальномеры, и пассивные видеокамеры. Из результатов анализа следует, что ультразвуковые датчики и лазерные триангуляционные датчики имеют малую дальность действия, из-за чего их нельзя применять в качестве активной системы безопасности автомобиля с большой скоростью движения. Радарная система на сегодняшний день используется в большинстве автомобилей. Основным преимуществом радара в сравнении с другими сенсорными системами (лидар, ультразвуковой датчик) является работоспособность в плохих погодных условиях (снег, дождь, туман) и даже при сильном загрязнении. По сравнению с лазерным дальномером, радарная система имеет недостатки: излучение в широком угле, что затрудняет определение формы и размеров объекта. Лазерные дальномеры имеют все требуемые характеристики для применения в автономном автомобиле и активной системе безопасности автомобиля. Однако недостатком дальномера является его цена. Стереоскопическая система имеет простую структуру построения и позволяет построить недорогой датчик для активной системы безопасности. Основной проблемой при использовании стереоскопической системы в качестве измерительной является определение сопряженных точек в стереопаре. В данной работе с целью разработки недорогой системы активной безопасности автомобиля выбрана стереоскопическая система как база для разработки активной стереоскопической системы. Имеено активная система решает основную задачу стереоскопической системы – определение сопряженных точек и в последующем – трехмерные координаты точек объекта.

На основании проведенного обзора можно сформулировать цель и задачи исследования.

Целью диссертационного исследования является теоретическое и экспериментальное исследование активной стереоскопической оптико-электронной системы (АСОЭС) анализа пространства для транспортных средств, использующей цифровые методы обработки информационных сигналов, а также разработка методик получения трехмерного изображения объектов и выделения их из исследуемой сцены.

Для достижения указанной цели требовалось решить **ряд задач**:

1) Произвести анализ и классификацию современных датчиков в активных системах безопасности транспортных средств.

2) Разработать методику и алгоритм выделения тест-объекта и определения координат его контрольных точек для автоматической калибровки стереоскопической системы, исследовать погрешности калибровки стереоскопической системы в зависимости от количества кадров.

3) Произвести анализ погрешности АСОЭС в зависимости от длины стереобазы, и схемы расположения видеокамер АСОЭС при фиксированной погрешности определения сопряженных точек в стереопаре.

4) Произвести выбор схемы расположения камер АСОЭС, а также разработать методики габаритного расчета АСОЭС.

5) Разработать методики обработки изображения с целью получения трехмерного изображения в АСОЭС.

6) Разработать алгоритм выделения объектов в наблюдаемой сцене и алгоритм различения объектов друг от друга.

2. Разработка методики автоматической калибровки стереоскопической системы.

При использовании стереоскопической системы с целью получения трехмерных координат объектов в наблюдаемой сцене, необходимо определить внутренние параметры каждой камеры стереоскопической системы и параметры относительного расположения этих камер. Этот процесс является калибровкой стереоскопической системы. В этой главе представляется анализ существующих методов калибровки и существующих тест-объектов для проведения калибровки. На основе результата анализа разработана методика автоматической калибровки стереоскопической системы.

2.1. Анализ существующих методов калибровки камеры и стереоскопической системы

В связи с повышением интереса к обработке трехмерных изображений стереоскопические системы на основе двух камер все шире применяются в задачах компьютерного зрения, таких как трехмерная реконструкция, трехмерная визуализация, локация объектов. Для получения информации о координатах объектов в пространстве необходимо заранее определить параметры каждой камеры и параметры стереоскопической системы. Эта задача называется калибровкой стереоскопической системы.

Задачу калибровки камеры можно разделить на 2 этапа. Первый этап – описание математической модели камеры с помощью набора параметров. Второй этап – определение значений этих параметров с помощью прямого или косвенного методов.

Существуют два типа параметров камеры и стереоскопической системы. К первому типу относятся внутренние параметры. Эти параметры камеры определяют метод получения изображения камеры и в них включаются следующие параметры: фокусное расстояние оптической системы, размер

элементов фотоприемника, координаты главной точки, значение дисторсии оптической системы. Ко второму типу относятся внешние параметры камеры. Внешние параметры камеры определяют положение и ориентацию камеры во внешней системе координат [50]. Существуют два набора параметров в группе внешних параметров: матрица поворота и вектор переноса. Для стереоскопической системы после калибровки каждой камеры, зная внешние параметры каждой камеры, можно определить их взаимное расположение.

Калибровка камеры может быть классифицирована по следующим критериям: линейная или нелинейная, внешняя или внутренняя, использование трехмерных точек как тест-объект (шахматная доска, точки в пространстве с известными координатами) или использование геометрических характеристик сцены как тест объект (линии, поверхности с известными параметрами). В настоящее время, самым распространённым видом тест-объект является вид «шахматная доска» (Рис.2.1).

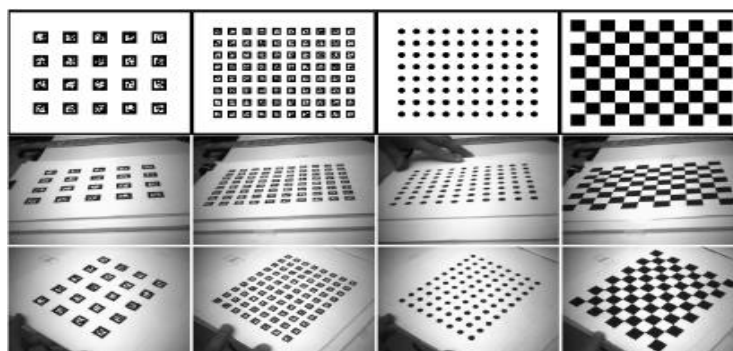


Рис. 2.1 Различные виды калибровочных тест объектов

На основании метода вычисления параметров камеры можно подразделить способы калибровки камеры в соответствии со следующими методами: метод нелинейной оптимизации, линейный метод с вычислением трансформационной матрицы, двух-шаговый метод, метод с использованием нейронной сети.

Методом нелинейной оптимизации является метод калибровки камеры, при котором все дефекты оптической системы камеры включаются в модели камеры. В этом случае параметры камеры часто рассчитаны с использованием итерации для минимизации определенной функции. Определенная функция в этом случае часто является дистанцией между реальной точкой на изображении и точкой, полученной с помощью предполагающей математической модели камеры. Некоторые примеры данного метода были описаны в [59] и [60].

Линейный метод, основанный на вычислении трансформационной матрицы, использует метод наименьших квадратов, чтобы получить трансформационную матрицу, которая преобразует трехмерные координаты точки в пространстве в двумерные координаты точки на плоскости изображения фотоприемника камеры. Этот метод достаточно простой и быстродействующий. Однако этот метод имеет существенный недостаток. Линейный метод не может калибровать камеру, имеющую оптическую систему с заметной дисторсией оптической системы. При этом реальные оптические системы в различной степени подвержены влиянию дисторсии. Некоторые пример линейного метода можно найти в публикациях [61,62,63,64].

Двух-шаговый метод использует линейный метод, чтобы рассчитать некоторые параметры камеры, а другие параметры рассчитаны с помощью нелинейного метода. Примеры использования данного метода можно найти в публикациях [65,66,67].

В таблицах 2.1–2.3 приводится сравнение точности и скорости расчета калибровки каждого метода. Точность работы алгоритма измерялась на основе критерия близости набора точек к проекционному лучу [61].

Таблица 2.1 Измерение отклонения трехмерного положения

Метод	Отклонение в мм		
	Среднее значение	Среднее квадратическое	Макс.
Холл	0,1751	0,1241	0,58
Фаугерас	0,1985	0,1410	0,91
Фаугерас без устранения дисторсии	0,13311	0,8123	0,21
Фаугерас с устранением дисторсии	0,0674	0,1594	0,08
Тсай	0,1341	0,4010	0,29
Тсай (большое количество параметров камеры)	0,0545	0,1521	0,09
Калибровка с использованием нейронной сетей.	0,0624	0,1532	0,08

Таблица 2.2 Измерение отклонения двухмерного положения

Метод	С дисторсией, отклонение в пиксел			Без дисторсии, отклонение в пиксель		
	Среднее значение	Среднее квадратическое	Макс.	Среднее значение	Среднее квадратическое	Макс.
Холл	0,2680	0,2002	1,20	0,2680	0,2002	1,20
Фаугерас	0,2690	0,2000	1,01	0,2690	0,2000	1,01
Фаугерас без устранения дисторсии	0,2820	0,2123	1,21	0,2820	0,2123	1,21
Фаугерас с устранением дисторсии	0,0870	0,0524	0,25	0,0854	0,0425	0,24
Тсай	0,1920	0,1210	0,60	0,1802	0,1102	0,61
Тсай (большое количество параметров камеры)	0,0822	0,0423	0,20	0,0811	0,0411	0,18
Калибровка с использованием нейронной сетей.	0,0833	0,0502	0,26	0,0832	0,0492	0,25

Таблица 2.3 Время расчета калибровки

Метод	Время (мс).
Холл	2
Фаугерас	2
Фаугерас с дисторсией	15
Тсай	50
Нейронная сеть	2000

Как видно из таблиц, методы, не устраняющие дисторсию, дают приблизительно одинаковые по точности результаты и менее точные чем остальные методы. Метод Холла является наилучшим методом калибровки камеры из тех методов калибровки, которые не устраняют дисторсию. Остальные - нелинейные методы и метод нейронной сети дают лучший результат. Однако метод нейронной сети требует большое время предварительного обучения и параметры вычисляются во много раз дольше, чем другими методами. Метод, предложенный Тсай, работает с большим количеством параметров камеры и дает наилучший результат. Поэтому далее мы рассмотрим метод калибровки Тсай с большим количеством параметров.

2.2. Калибровка камеры и стереоскопической системы методом Тсай с большим количеством параметров камеры

В методе Тсай [62], модель регистрации изображения камеры учитывает радиальную дисторсию. Существуют 3 типа тест-объектов, которые можно использовать в методе Тсай. Первый тип: одно изображение плоского тест-объекта. Второй тип: несколько изображений плоского тест-объекта. Третий тип: одно изображение трехмерного тест-объекта.

Экспериментально подтверждено, что чем больше количество контрольных точек, тем лучше можно получить результат калибровки. Так как тест-объект имеет ограниченный размер и, следовательно, количество контрольных точек на тест-объекте также ограничено, чтобы получить

большое количество контрольных точек, мы можем регистрировать тест-объект в нескольких положениях. Кроме того, выполнить тест-объект в виде плоскости легче чем в объемном виде. В итоге, для калибровки камеры и стереоскопической системы, мы выполняем регистрацию плоского тест-объекта в нескольких различных положениях. Алгоритм калибровки выполняется следующим образом.

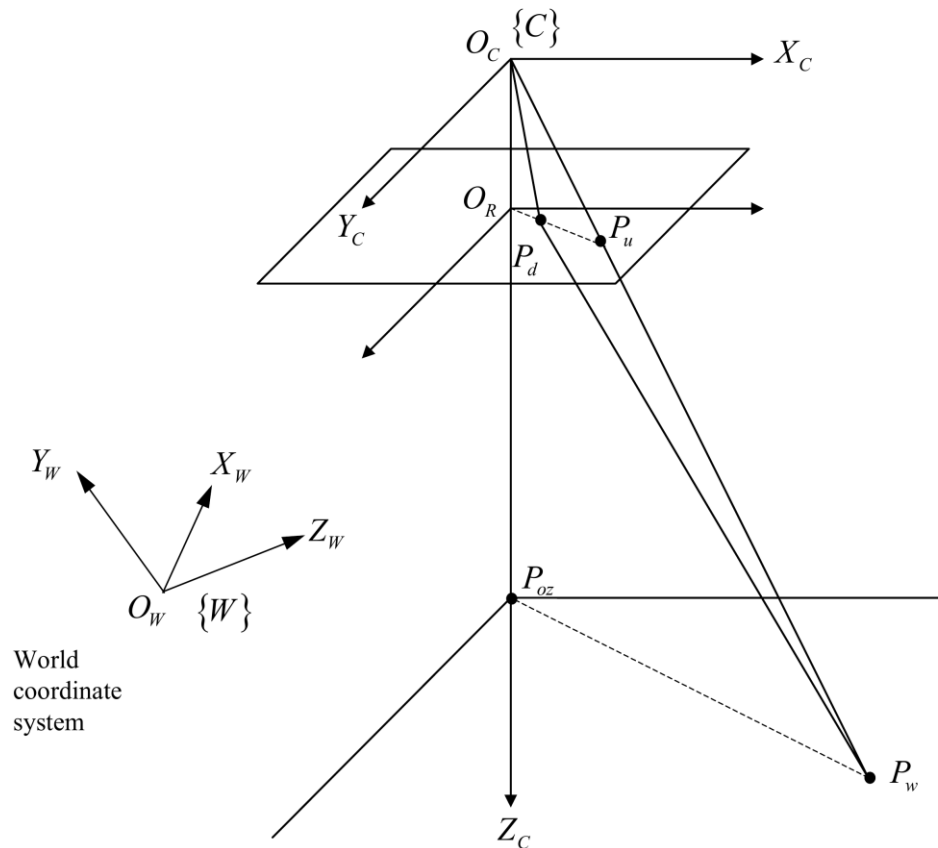


Рис. 2.2 Модель регистрации изображения камеры

Дисторсия, как фактор искажения изображения, возникает в результате того, что для объектива камеры идеальной формой линзы является параболическая, а на практике по технологическим соображениям линза имеет сферический вид. Как показано на рисунке 2.2, идеальное изображение пространственной точки P_w должно быть точкой P_u . Вследствие дисторсии получается в плоскости изображения не точка P_u , а точка P_d . Пространственная точка P_w находится в общей системе координат $O_w X_w Y_w Z_w$

и имеет координаты $({}^wX_w, {}^wY_w, {}^wZ_w)$. Чтобы перевести точку P_w в систему координат камеры $O_cX_cY_cZ_c$ необходимо определить матрицу поворота R_w и вектор переноса T_w . Эти два параметра являются внешними параметрами камеры. В этом случае формула трансформации имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} {}^cX_w \\ {}^cY_w \\ {}^cZ_w \end{bmatrix} = R_w \begin{bmatrix} {}^wX_w \\ {}^wY_w \\ {}^wZ_w \end{bmatrix} + T_w; \quad (2.1)$$

где:

$$R_w = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, T_w = [t_x \quad t_y \quad t_z].$$

После получения координат точки P_w в системе координат камеры на основе модели Pinhole камеры [63], мы можем определить координаты изображения – точки P_u на плоскости изображения камеры без учета дисторсии:

$${}^cX_u = f \frac{{}^cX_w}{{}^cZ_w}, \quad {}^cY_u = f \frac{{}^cY_w}{{}^cZ_w}, \quad (2.2)$$

Где f – фокусное расстояние оптической системы камеры.

Координаты точки P_d можно определить с помощью формулы:

$${}^cX_d = {}^cX_u - \delta x, \quad {}^cY_d = {}^cY_u - \delta y, \quad (2.3)$$

где δx и δy – ошибки по оси X и оси Y вследствие радиальной дисторсии [64].

$$\delta x = k_1 {}^cX_d ({}^cX_d^2 + {}^cY_d^2), \quad \delta y = k_1 {}^cY_d ({}^cX_d^2 + {}^cY_d^2), \quad (2.4)$$

где k_1 – коэффициент дисторсии.

Учитывая формулы (2.1)-(2.4), получаем:

$$\begin{aligned}
{}^cX_d + {}^cX_d k_1 r^2 &= f \frac{r_{11} {}^wX_w + r_{12} {}^wY_w + r_{13} {}^wZ_w + t_x}{r_{31} {}^wX_w + r_{32} {}^wY_w + r_{33} {}^wZ_w + t_z}, \\
{}^cY_d + {}^cY_d k_1 r^2 &= f \frac{r_{21} {}^wX_w + r_{22} {}^wY_w + r_{23} {}^wZ_w + t_y}{r_{31} {}^wX_w + r_{32} {}^wY_w + r_{33} {}^wZ_w + t_z},
\end{aligned} \tag{2.5}$$

где

$$r = \sqrt{{}^cX_d^2 + {}^cY_d^2}.$$

Как правило, координаты точки в изображении определяются в системе координат изображения. Начало этой системы находится в верхнем левом углу, а используемые единицы измерения - число пикселей. Чтобы перевести координаты точки из системы координат изображения в координаты системы координат камеры, можно использовать следующее преобразование:

$${}^cX'_{di} = -({}^iX_{di} - u_0)d'_x, \quad {}^cY'_{di} = -({}^iY_{di} - v_0)d_y, \tag{2.6}$$

где:

(u_0, v_0) – координаты главной точки,

$({}^iX_{di}, {}^iY_{di})$ – координаты i -ой точки в системе координат изображения и измеряемые в пикселях,

$d'_x = d_x N_{cx} / N_{fx}$, d_x – расстояние от центра до центра соседних точек по оси X,

d_y – расстояние от центра до центра соседних точек по оси Y,

N_{cx} – количество пикселей по оси X,

N_{fx} – количество пикселей в одной строке изображения, ${}^cX'_{di} = {}^cX_{di} s_x$, ${}^cY'_{di} = {}^cY_{di} s_x$ – фактор масштаба изображения.

На рисунке 2.2 показано отношение между точками P_d и P_w .

У нас есть два вектора $O_R P_d$ и $P_{oz} P_w$, и они параллельны друг другу. Из этого следует:

$${}^c X_d \quad {}^c Y_w = {}^c Y_d \quad {}^c X_w, \quad (2.7)$$

Подставив формулу (2.1) в формулу (2.7), получаем:

$${}^c X_d (r_{21} {}^w X_w + r_{22} {}^w Y_w + r_{23} {}^w Z_w + t_y) = {}^c Y_d (r_{11} {}^w X_w + r_{12} {}^w Y_w + r_{13} {}^w Z_w + t_x). \quad (2.8)$$

Из формул (2.6) и (2.8) получаем следующее выражение для i -ой точки:

$${}^c X'_{di} = \begin{bmatrix} {}^c Y'_{di} {}^w X_{wi} \\ {}^c Y'_{di} {}^w Y_{wi} \\ {}^c Y'_{di} {}^w Z_{wi} \\ {}^c Y'_{di} \\ - {}^c X'_{di} {}^w X_{wi} \\ - {}^c X'_{di} {}^w Y_{wi} \\ - {}^c X'_{di} {}^w Z_{wi} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \end{bmatrix}, \quad (2.9)$$

где

$$a_1 = t_y^{-1} s_x r_{11}, a_2 = t_y^{-1} s_x r_{12}, a_3 = t_y^{-1} s_x r_{13}, a_4 = t_y^{-1} s_x t_x, a_5 = t_y^{-1} r_{21}, a_6 = t_y^{-1} r_{22}, a_7 = t_y^{-1} r_{23}. \quad (2.10)$$

Используя n точек в тест-объекте для калибровки камеры, мы можем решить систему уравнений (2.9) методом наименьших квадратов и определить значения переменных $a_1 - a_7$. После получения значений переменных $a_1 - a_7$, параметры камеры можно определить с помощью следующей формулы:

$$|t_y| = \frac{1}{\sqrt{a_5^2 + a_6^2 + a_7^2}},$$

На этом этапе мы не знаем знак t_y . Предполагая, что t_y имеет положительное значение, из формул (2.10) мы можем получить значения переменных $t_x, r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}$. Здесь становится возможным проверить знак t_y с помощью формулы:

$$\begin{aligned} {}^cX_u &= r_{11} {}^wX_w + r_{12} {}^wY_w + r_{13} {}^wZ_w + t_x, \\ {}^cY_u &= r_{21} {}^wX_w + r_{22} {}^wY_w + r_{23} {}^wZ_w + t_y, \end{aligned} \quad (2.11)$$

Если оба элемента (${}^cX_u, {}^cY_u$) имеют такой же знак, как у элементов (${}^iX_u, {}^iY_u$), тогда t_y имеет положительный знак; если нет, то t_y имеет отрицательный знак. После получения значения t_y , нам необходимо пересчитать значения переменных $t_x, r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}$.

Фактор масштаба изображения можно получить с использованием следующей формулы:

$$s_x = |t_y| \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}.$$

Особенность матрицы R [50] состоит в том, что она зависит только от трех параметров, поскольку все девять ее элементов связаны шестью уравнениями связи и, следовательно, не являются независимыми. Обозначив строки матрицы в виде векторов r_1^T, r_2^T, r_3^T , эти уравнения можно представить в виде:

$$r_1^T r_1 = 1, r_2^T r_2 = 1, r_3^T r_3 = 1, r_1^T r_2 = 0, r_1^T r_3 = 0, r_2^T r_3 = 0,$$

Вышеуказанные уравнения являются условиями взаимной ортогональности векторов r_i . Матрица, построенная из таких векторов, называется ортогональной. Условие взаимной ортогональности векторов r_i в трехмерном пространстве можно выразить в другой удобной форме, которая понадобится нам позже:

$$r_3 = \pm(r_1 \times r_2), r_2 = \pm(r_3 \times r_1), r_1 = \pm(r_2 \times r_3).$$

Если известны две первые строки матрицы поворота, мы можем рассчитать третью строку данной матрицы путем получения векторного произведения двух первых строк, и учитывая, что детерминант матрицы поворота равен 1. Всегда существует только одно решение для третьей строки матрицы поворота. В дальнейшем необходимо вычислить фокусное расстояние оптической системы камеры, третий компонент вектора переноса и коэффициент дисторсии.

Предполагая коэффициент дисторсии $k_1=0$, из (2.5) для любой точки можно определить:

$$\begin{bmatrix} r_{21} {}^wX_w + r_{22} {}^wY_w + r_{23} {}^wZ_w + t_y & - {}^cY_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ t_z \end{bmatrix} = (r_{31} {}^wX_w + r_{32} {}^wY_w + r_{33} {}^wZ_w) {}^cY_d, \quad (2.12)$$

Если у нас есть две переменных и количество контрольных точек больше чем две, тогда из (2.12) мы можем составить линейную систему уравнений. Далее, решив эту систему методом наименьших квадратов, получаем приблизительные значения фокусного расстояния и третьего компонента вектора переноса. Чтобы получить точные значения f , k_1 , t_z необходимо решить уравнение (2.5) используя стандартную схему оптимизации, например, метод наискорейшего спуска [65]. В итоге, метод калибровки камеры Тсай можно описать следующим образом (Рис. 2.3):

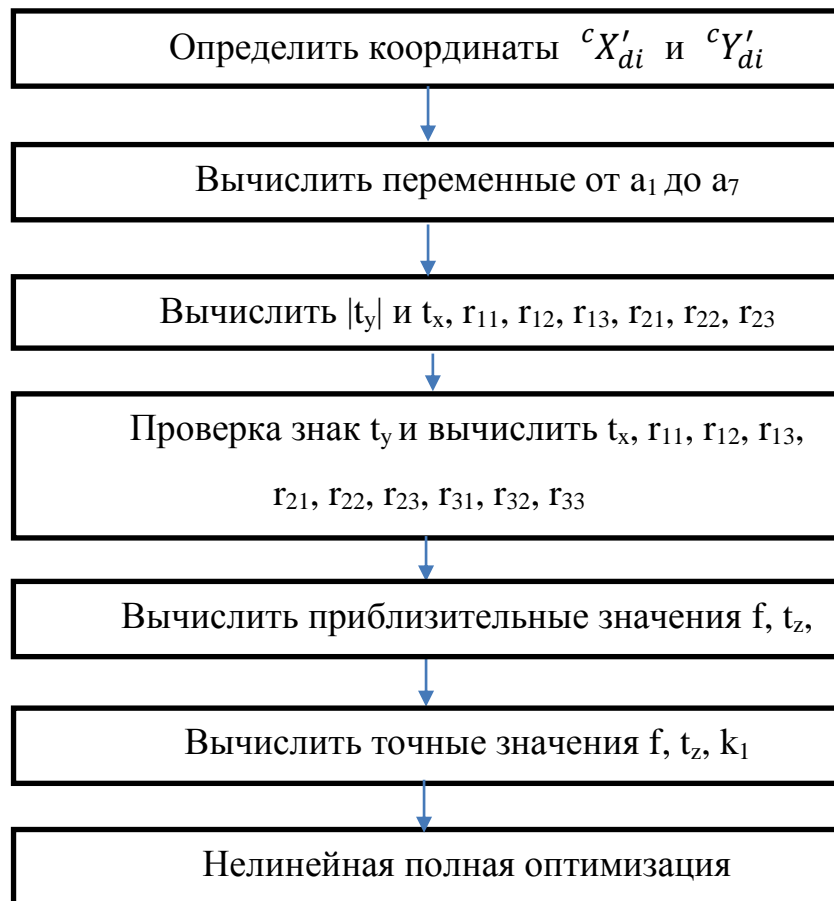


Рис. 2.3 Метод калибровки Тсай

После калибровки отдельных камер стереоскопической системы становится известным положение каждой камеры в общей системе координат. Далее нам необходимо найти положение одной камеры относительно другой. Пусть R' и R'' – ортогональные матрицы, описывающие ориентацию первой и второй камер в общей системе координат, а t', t'' – вектор преобразования, определяющий положения оптических центров первой и второй камер в общей системе координат.

Ортогональную матрицу R , описывающую ориентацию системы координат второй камеры относительно первой и вектор трансляции t , определяющий положение оптического центра второй камеры в системе координат первой, вычисляют по следующим формулам:

$$R = R''R'^T, t = -R''R'^T t' + t''.$$

В итоге, после процесса калибровки стереоскопической системы, нам известны все параметры каждой камеры стереоскопической системы и относительные положения первой и второй камер. В процессе калибровки нам необходимо в ручном режиме определить координаты всех контрольных точек на тест-объектах. Точность определения этих координат влияет на результат калибровки. Так как количество этих точек может быть довольно велико (в ряде случаев приходится использовать до 200 точек), то процесс определения этих координат требует очень много времени.

В рамках данной работы предлагается методика автоматической калибровки стереоскопической системы, алгоритм для его реализации [66,67] и исследует погрешности параметров стереоскопической системы в зависимости от количества используемых изображений тест-объекта.

2.3.Методика автоматической калибровки стереоскопической системы

В 2010 году, Jean-Yves Bouquet предложил программу калибровки стереоскопической системы [68], написанную в среде MatLab. При работе с этой программой, пользователям необходимо выбирать вручную точки на изображениях, и этот трудоемкий процесс занимает много времени, кроме того результат калибровки зависит от возможных ошибок оператора.

Для облегчения процесса калибровки стереоскопической системы, предлагается новый вид тест-объекта [67], а также алгоритм обработки полученного изображения и определения координат тестовых точек. Как известно, объекты в изображении можно выделить с помощью метода выделения связных областей на бинарных изображениях [69]. В некотором случае, когда тест-объект и фон имеют один и тот же цвет, вышесказанный метод выдает не верный результат. Чтобы избежать от этой проблемы, предлагается новый вид тест-объекта. Предложенный тест-объект имеет вид шахматной доски с контрастной рамкой, которая в данном случае черного

цвета. Она позволяет легко отделить тест-объект от фона. Рекомендованное расстояние от крайних точек шахматной доски до рамки равно половине ширины её ячейки (рис.2.4).

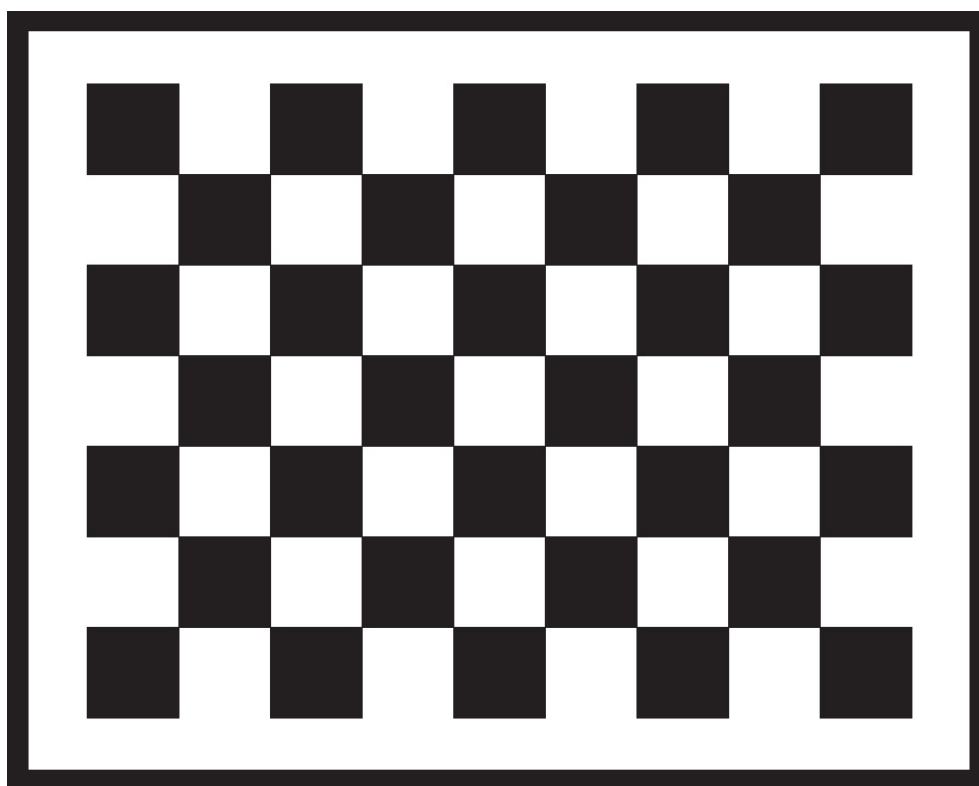


Рис.2.4 Изображение тест объекта

С использованием нового вида тест объекта, методика автоматической калибровки стереоскопической системы заключается в следующем:

- производится регистрация набора изображений тест-объекта;
- осуществляется пороговая фильтрация изображения;
- выделяются все объекты в изображении, используя метод выделения связанных областей на бинарных изображениях;
- с помощью корреляционного метода распознавания изображений производится распознавание тест-объекта по его размерам, форме;
- удаляется фон вокруг тест-объекта;
- определяется положение четырех крайних точек тест-объекта;
- производится калибровка первой и второй камер, а также стереоскопической системы в целом с помощью метода Тсяя.

Компьютерная программа по данной методике реализована в среде Matlab. Для выделения всех объектов в изображении, использован инструмент Blob analysis в среде Matlab. При расчете параметров каждой камеры, и параметров стереоскопической системы, использована программа, написанная Jean-Yves Bouguet [68].

Для проверки способности работы вышеуказанного алгоритма и исследования погрешности параметров стереоскопической системы, был проведен эксперимент с использованием физической модели.

Экспериментальный стенд включает в себя два телевизионных датчика типа A4Tech PKS-730G со следующими параметрами:

- разрешение 640×480 пикселей,
- размер одного пикселя 3,6×3,6 мкм,
- расстояние между камерами – 106,5 мм,
- фокусное расстояние оптической системы каждой камеры – 3,0 мм.

Тестовый объект представляет собой поле, состоящее из 9×7 чередующихся черных и белых квадратов и черную рамку. При этом размер квадрата составляет 28×28 мм.

Оба датчика регистрируют тест объект в пятидесяти произвольных положениях. После получения набора изображений производится процесс определения координат крайних точек с помощью разработанного автором программного обеспечения, а также выполняется калибровка камер и системы в целом с использованием различных наборов изображений.

На рис.2.5 показан результат работы программного обеспечения, которое использует разработанный алгоритм.

После получения с камеры изображения тест объекта (рис.2.5, а) изображение обрабатывается пороговым фильтром, результат работы которого показан на рис.2.5, б. На данном этапе результат обработки представляет собой бинарное изображение, на котором фон имеет черный цвет.

Контрастная рамка тест-объекта после процесса пороговой фильтрации является фоном, шахматная доска становится объектом, который не соприкасается с другими объектами на изображении. Контрастная рамка выполняет функцию отделения шахматной доски от других объектов на изображении.

С помощью встроенного в пакет MatLab инструмента Blob Analysis, можно выделить все объекты на изображении. Этим инструментом изображение шахматной доски выделяется на исходном изображении. Результат данного этапа показан на рис.2.5, в.

На следующем этапе происходит процесс удаления фона для каждого из выделенных объектов. Результат работы данного этапа показан на рис.2.5, г.

Для каждого изображения объекта из предыдущего этапа, используется пороговая фильтрация и инструмент toolbox Blob Analysis для выделения объекта и определения координат крайних точек (рис.2.5,д).

По результатам анализа формы полученного объекта можно определить, что данной объект является шахматной доской.

После получения набора координат крайних точек, можно выполнить процесс калибровки каждой отдельной камеры, результат которой показан на рис.2.5, ж.

После калибровки каждой отдельной камеры можно выполнить калибровку стереоскопической системы, результат которой показан на

рис.2.5, з. Процесс калибровки выполняется с помощью инструмента Camera Calibration Toolbox, предложенного Jean-Yves Bouguet [68].

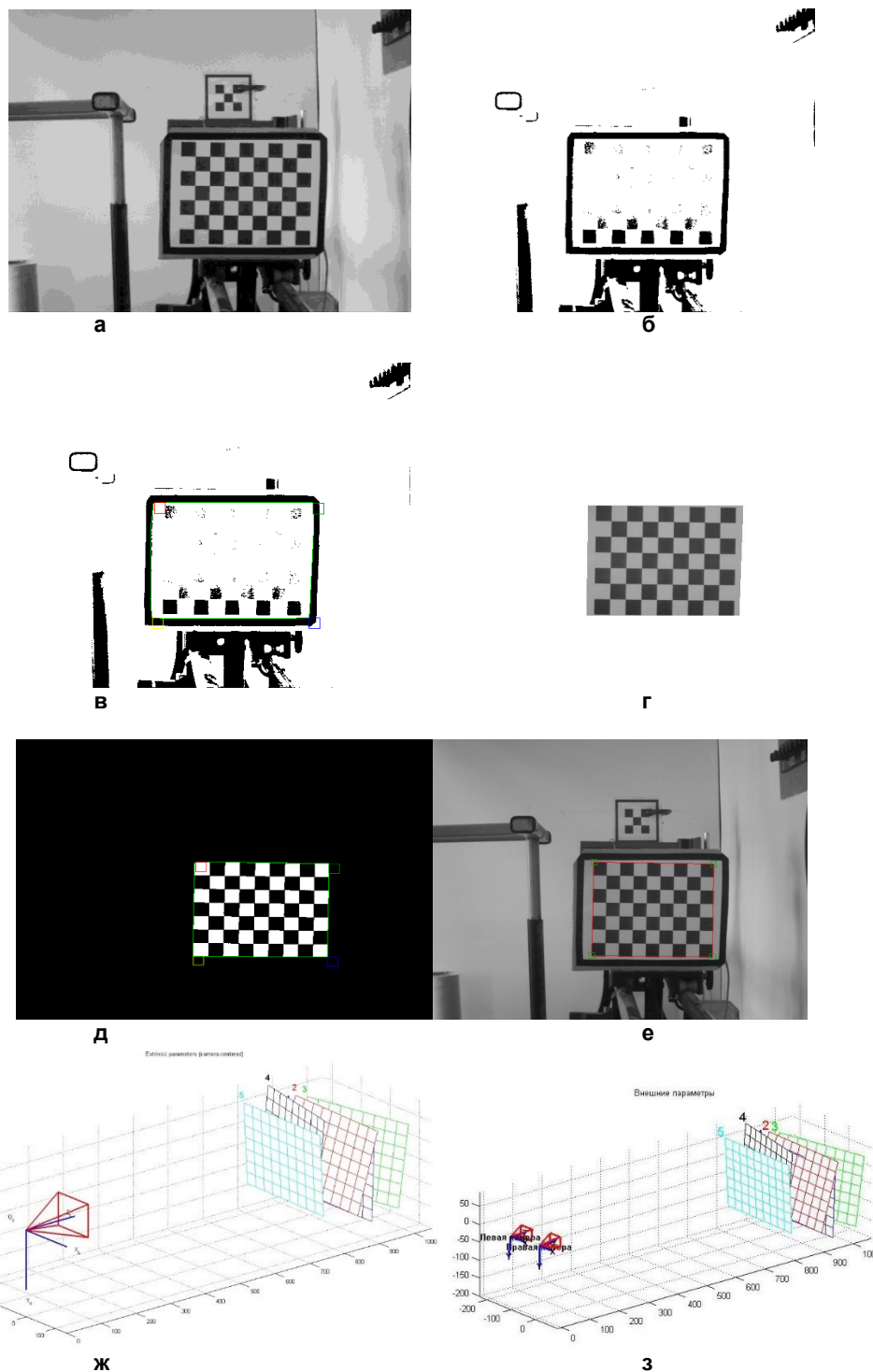


Рис. 2.5. Визуализация результата калибровки: пример изображения тестового объекта, полученный камерой (а); результат применения пороговой фильтрации (б); результат определения тестового объекта по внешней рамке (в); результат удаления внешнего фона (г); определение координат крайних точек (д); определение положения шахматного поля (е); результат калибровки одной камеры (ж); результат калибровки стереоскопической системы (з)

Было проведено исследование факторов, влияющих на погрешности определения координат крайних точек и погрешности калибровки системы в зависимости от количества изображений. Для проверки погрешности определения координат крайних точек, были сформированы 50 изображений тест-объекта в разных положениях и определены координаты в ручном и автоматическом режиме.

Погрешность автоматического определения координат крайних точек по оси Ox и по оси Oy составляет 1,1 пикселя. Этот результат получен путем обработки серии из 52 изображений, полученных с каждой из камер, составляющих стереопару. В каждом изображении есть 4 крайние контрольные точки, и каждая камера снимают 52 изображения. В итоге необходимо определить координаты 416 точек. В ручном режиме, координаты каждой точки определили 5 раз и за конечные координаты приняли среднее значение. В автоматическом режиме, координаты каждой точки определили один раз, и погрешность определения каждой точки определили путем вычитания координат ручного режима из координат автоматического режима. Средняя погрешность автоматического определения координат крайних точек относительно ручного режима по оси Ox и оси Oy составляет 1,1 пикселя (Рис. 2.6).

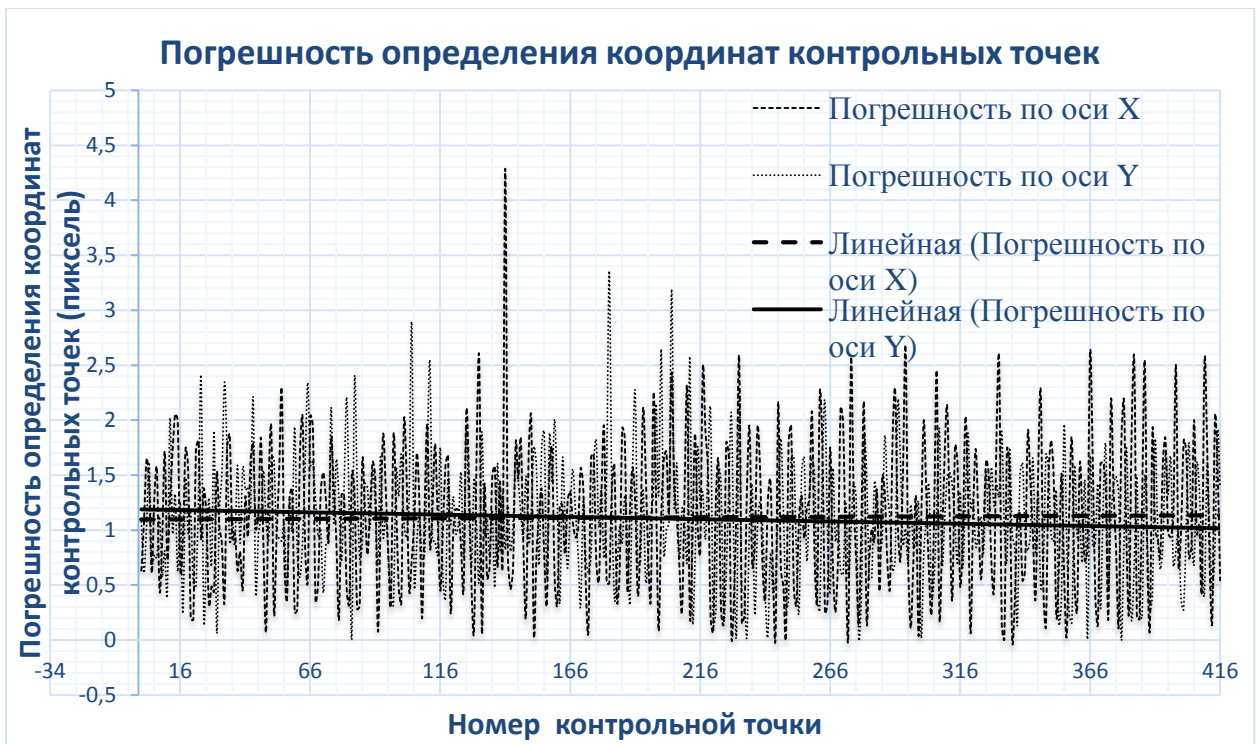
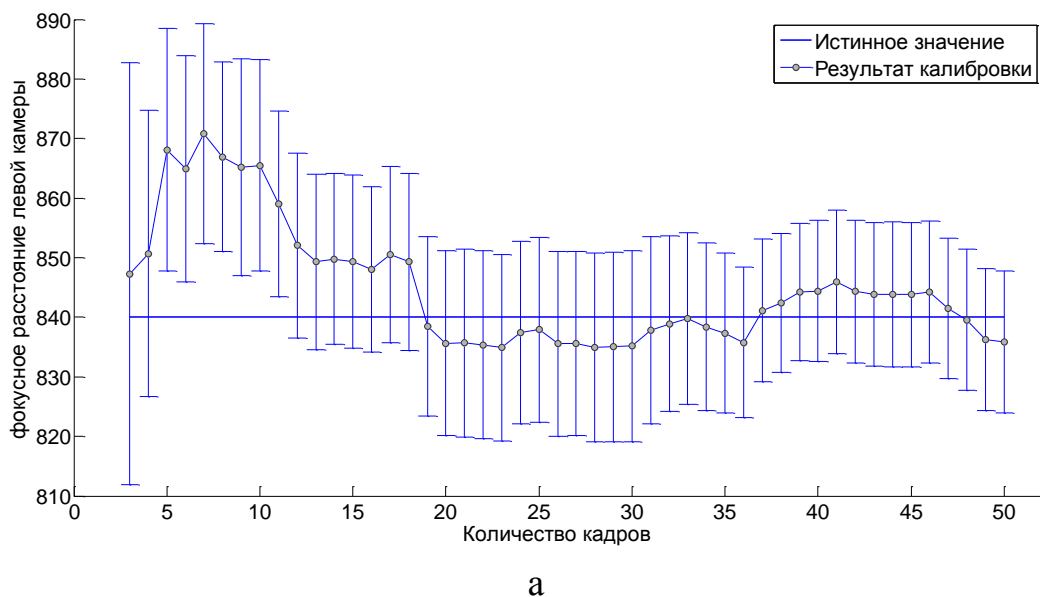
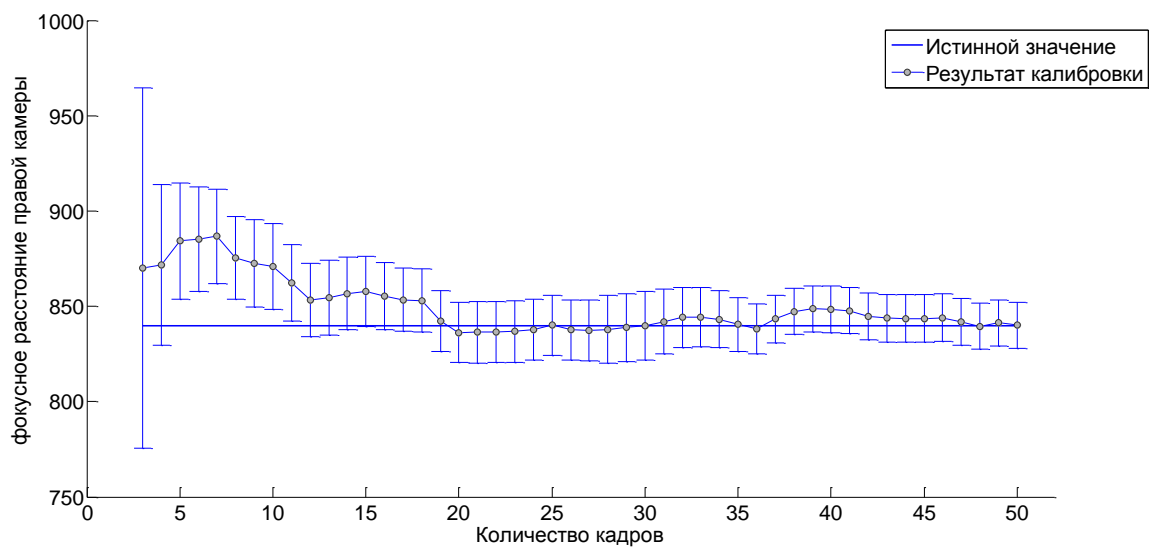


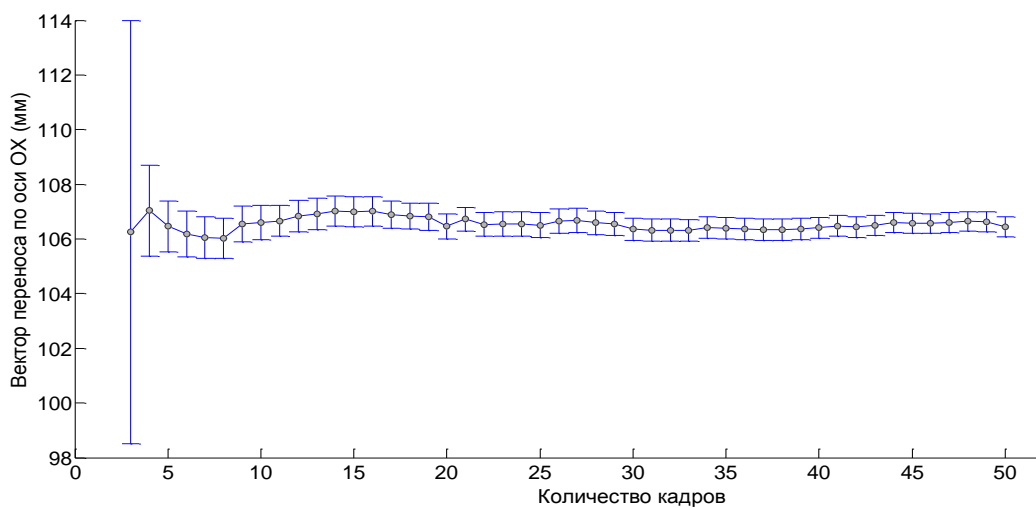
Рис. 2.6 Погрешность определения координат контрольных точек автоматического режима относительно ручного режима

Рис.2.7 иллюстрирует результаты работы программного обеспечения в зависимости от количества изображений, полученных стереопарой.

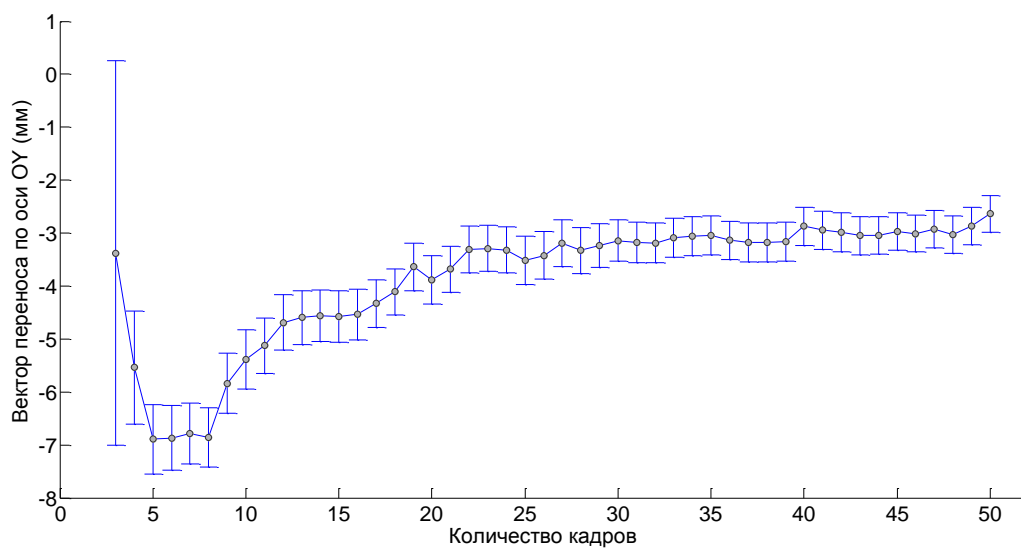




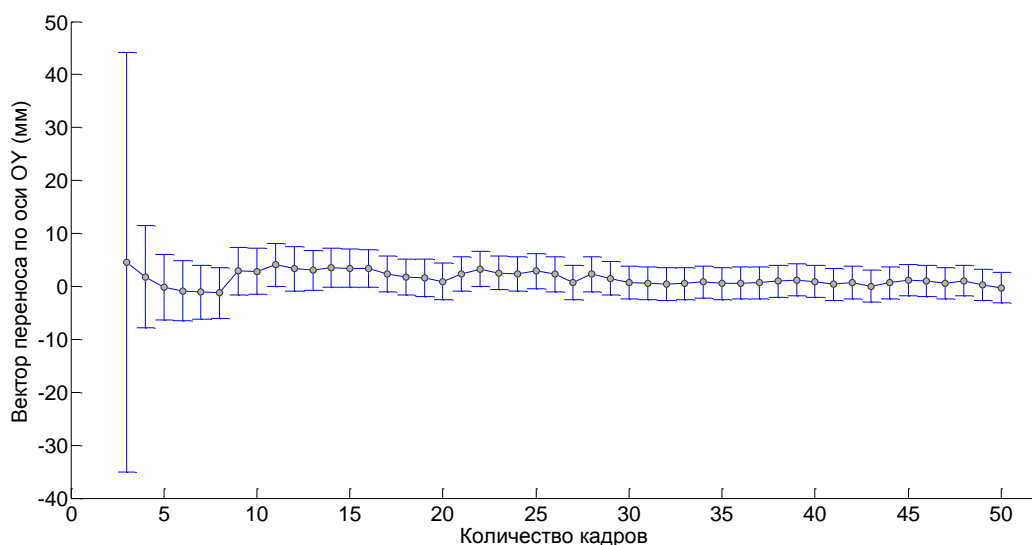
б



в



Г



Д

Рис. 2.7. Результаты калибровки камеры в зависимости от количества полученных изображений тест-объекта от 2 до 50; расстояния между камерами t_x , t_y , t_z (в-д); параметров камеры – фокусное расстояние f/w (а-б); f – фокусное расстояние объективов камер, мм, w – размер пикселя матричного фотоприемника, мкм

Для оценки погрешности калибровки было использовано 50 изображений тест-объекта при его различных произвольных положениях. При этом использовались фиксированные значения расстояния между камерами t_x , t_y , t_z (рис. 2.7, в-д) и параметров камеры f и w (рис. 2.7, а-б) (на графиках они отмечены как истинные значения), с которыми сравнивается результат калибровки. Из этих графиков видно, что погрешность убывает с увеличением количества изображений тест-объекта, участвующих в калибровке системы [70].

Можно сделать вывод, что результат калибровки стабилизируется при количестве снимков больше двадцати. Таким образом, в практических применениях предложенного алгоритма для получения приемлемых результатов нужно не менее двадцати изображений тест-объекта.

2.4. Выводы по главе 2

В данной главе представлен анализ существующих методов получения внутренних параметров камер и параметров относительного расположения двух камер в стереоскопической системе. По результатам анализа точности и скорости получения этих параметров, выбран метод калибровки Тсая. Предложен новый вид тест-объекта, который обеспечивает автоматический процесс калибровки. Новый тест-объект на основе шахматной доски имеет дополнительную контрастную рамку. Контрастная рамка позволяет отделить тест-объект от окружающего фона, поэтому появляется возможность автоматически определить координаты контрольных точек в изображениях. Разработана методика автоматической калибровки стереоскопической системы в среде Matlab, и представлен результат анализа погрешности калибровки в зависимости от количества снимков, на основании чего сделан вывод о том, что результат калибровки стабилизируется при количестве снимков не менее двадцати. С помощью автоматического метода калибровки стереоскопической системы на практике можно быстро калибровать стереоскопические системы с большим количеством снимков и при этом результат калибровки не зависит от субъективных факторов, таких как дрожание рук оператора или его утомление.

3. Выбор и исследование принципа работы, структурной схемы и основных параметров активной стереоскопической системы.

По результатам обзора датчиков анализа среды для активной системы безопасности автомобиля была выбрана стереоскопическая система, так как на ее основе можно построить систему безопасности с доступной ценой. В стереоскопической системе основной задачей является задача определения сопряженных точек в стереопаре. В данной главе рассмотрена структурная схема активной стереоскопической системы и исследована ее погрешность. На основе результатов исследования погрешности представлена схема расположения камер в стереоскопической системе, и методика расчета ее параметров.

3.1. Структурная схема и ее анализ

Предлагаемая активная стереоскопическая система [71,72] включает в себя две одинаковые камеры 1 и лазерный сканнер 2. Перед камерами устанавливаются узкополосные оптические фильтры. Полосы пропускания этих фильтров соответствуют длине волны лазерного излучения сканнера. Тем самым, в камеру поступает только оптический сигнал, полученный в результате отражения лазерного луча от объекта. Тем самым, упрощается процесс распознавания лазерного луча на изображениях стереопары. Лазерный сканнер имеет шаговый двигатель, которым управляет ЭВМ 6. Эта ЭВМ также управляет синхронизатором 4, который обеспечивает синхронную работу камер. Сигнал с камер поступает в блок предварительной обработки 5. Здесь происходит процесс распознавания лазерного луча на каждом изображении.

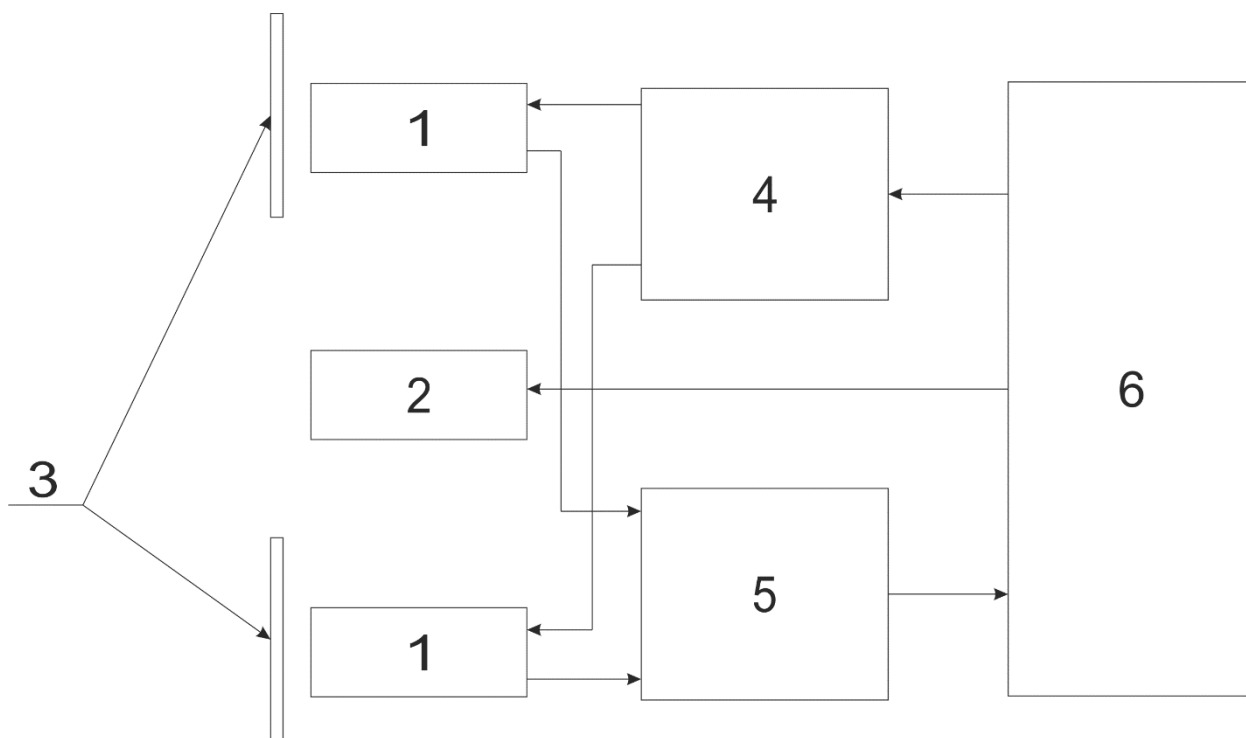


Рис. 3.1 Структурная схема стереоскопической системы со сканирующим лазером. 1- видеокамера, 2 – лазерный сканнер, 3 – узкополосный оптический фильтр, 4- синхронизатор, 5 – блок предварительной обработки изображения, 6 – ЭВМ

При получении каждой строки кадра с обеих камер блок предварительной обработки сравнивает ее с такой же строкой предыдущего кадра. Разница между ними является зоной, где находится лазерный луч. По информации о распределении энергии отраженного луча в данной зоне мы можем построить график распределения этой энергии и найти точку максимального значения энергии, и эта точка является энергетическим центром тяжести отраженного лазерного луча в данной строке. Этот метод дает возможность определения энергетического центра тяжести лазерного луча с точностью до 0,1 пикселя.

После получения информации со всех строк данного кадра и получения координат энергетического центра тяжести отраженного излучения для всех строк блок предварительной обработки передает эти координаты в ЭВМ. Во

время получения следующей пары кадров с камер, в ЭВМ происходит процесс определения трехмерных координат всех точек предыдущего кадра.

В памяти ЭВМ уже заранее вычислены все эпилюлярные линии для всех точек на первом изображении стереопары. После получения информации с блока предварительной обработки, ЭВМ сканирует все энергетические центры тяжести на первом изображении стереопары. Для каждого энергетического центра тяжести ЭВМ выбирает из памяти соответствующую эпилюлярную линию и находит пересечение этой линии с линией, образуемой энергетическими центрами тяжести второго изображения. После получения точки пересечения двух линий, рассчитываются соответствующие пространственные координаты этой точки. Этот алгоритм обработки дает возможность получения трехмерных координат объектов в реальном времени.



Рис. 3.2 Структурная схема лазерного сканнера

Лазерный сканнер включает в себя источник излучения - лазер, модулятор и оптическую систему преобразования лазерного луча. Исследуемые объекты системы являются движущимися, поэтому яркость в каждой точке зависит от времени и становится заметным смазывание изображения вследствие высокой скорости. Следовательно, необходимо сокращать время накопления кадра или переходить к импульсному режиму экспонирования фотоприемника [73]. Следовательно, в данной системе источник освещения должен работать в импульсном режиме, и это реализуется с помощью модулятора. Оптическая система преобразования лазерного луча имеет 3 элемента: телескопическую систему, цилиндрическую линзу и вращающуюся зеркальную систему. Телескопическая система изменяет угол расходимости лазерного луча таким

образом, что ширина лазерного пятна в плоскости изображения камер примерно равна ширине одного пикселя. Это делается для упрощения процесса и уменьшения погрешности определения координат изображения лазерного пятна. Цилиндрическая линза преобразует лазерный луч в вертикальную линию. Вращающаяся зеркальная система вращает вертикальный лазерный луч вокруг оси, чтобы сканировать пространство.

3.2. Выбор схемы расположения камеры

Точность определения пространственных координат точек с помощью стереоскопической системы зависит от ряда источников погрешностей, которые можно разделить на следующие группы [74,75]:

- Погрешности построения изображения или физические погрешности фотоснимков.
- Погрешности определения внутренних параметров камеры.
- Погрешности определения внешних параметров стереоскопической системы.
- Погрешности определения координаты сопряженных точек в стереопаре.
- Методические погрешности, вызванные упрощением технологии обработки снимков и допускающие заведомые отклонения от точных законов преобразования центральной проекции в ортогональную.

Первые три группы источников погрешностей измерения стереоскопической системы относятся к систематическим погрешностям. Они могут быть устранены путем повышения точности процесса калибровки и последующей компенсации в процессе измерения. Четвертая группа источников погрешности — это случайные погрешности измерения, и они зависят от алгоритма определения координат сопряженных точек в стереопаре и могут ослабляться с помощью выбора схемы расположения стереоскопической системы и параметров оптической системы каждой

камеры. Для улучшения результата измерения стереоскопической системы, необходимо выбрать ту схему, в которой влияние случайных погрешностей измерения оказывается меньше.

3.2.1. Математический анализ погрешности измерения стереоскопической системы при фиксированной погрешности определения сопряженных точек в стереопаре.

На рисунке 3.3 представлена модель стереоскопической системы. На плоскости изображения левой камеры выбирается точка X_1 и необходимо найти ее сопряженную точку на плоскости изображения правой камеры. Для точки X_1 реальная сопряженная точка правой камеры – X_2 . Вследствие погрешности определения сопряженной точки вместо точки X_2 получается точка X_2' . Полученная систематическая погрешность X_2X_2' равна Δ . Из-за погрешности Δx , вместо точки $M(X, Y, Z)$ получается точка M' и величина погрешности определяется как $MM' = d = (dx^2 + dz^2)^{1/2}$. Углы $OMO' = \beta$, $H_2O'X_2 = \alpha$, $X_2O'X_2' = \Delta\alpha$.

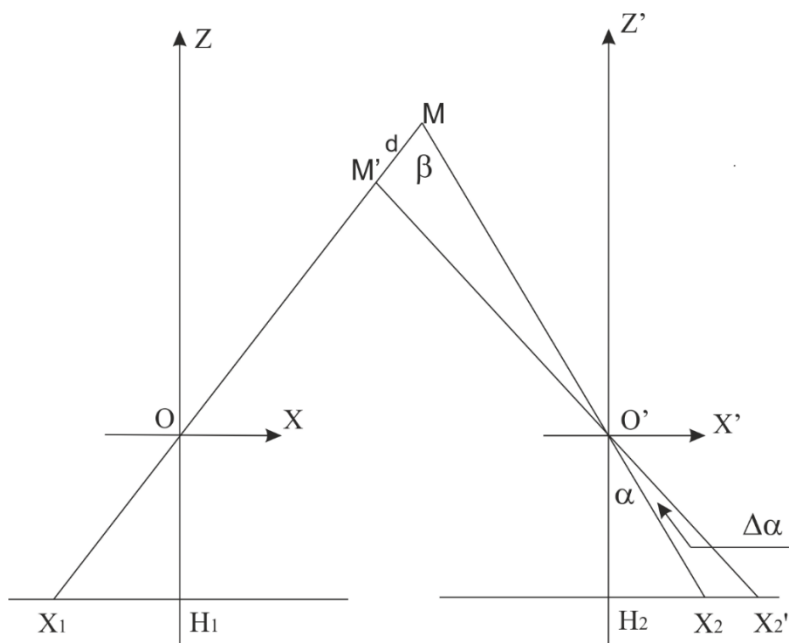


Рис. 3.3 Стереоскопическая система

Из треугольника $O'MM'$ получаем:

$$d = \frac{O'M \cdot \sin(\Delta\alpha)}{\sin(180 - \beta - \Delta\alpha)}, \quad (3.1)$$

где

$$\Delta\alpha = \arctg\left(\frac{x_2 + \Delta}{f}\right) - \arctg\left(\frac{x_2}{f}\right),$$

$$dz = \frac{d \cdot f}{\sqrt{f^2 + x_1^2}}, \quad dx = \frac{d \cdot x_1}{\sqrt{f^2 + x_1^2}}.$$

Рассмотрим случай, когда правая камера вращается вокруг оси $O'Y'$ и расстояние между камерами OO' неизменно. В этом случае длина отрезка $O'M$ и угол β также неизменны. Тогда из формулы (3.1) следует, что значение d зависит от значения $\Delta\alpha$:

$$d = \frac{O'M \cdot \sin(\Delta\alpha)}{\sin(180 - \beta) \cdot \cos(\Delta\alpha) - \cos(180 - \beta) \cdot \sin(\Delta\alpha)} = \frac{O'M}{\sin(\beta) \cdot \cotg(\Delta\alpha) + \cos(\beta)}. \quad (3.2)$$

При увеличении $\Delta\alpha$, значение функции $\cotg(\Delta\alpha)$ уменьшается, и величина d увеличивается. При постоянном значении Δ , величина угла $\Delta\alpha$ зависит от положения X_2 на плоскости изображения правой камеры. При движении точки X_2 к H_2 значение угла $\Delta\alpha$ увеличивается, следовательно, погрешность измерения системы также увеличивается.

В то же время при движении точки X_2 к краю плоскости изображения правой камеры значение угла $\Delta\alpha$ уменьшается и погрешность измерения системы также уменьшается. Углы, на которых стереоскопическая система имеет максимальную и минимальную погрешности, описываются следующими формулами:

$$\omega_{max} = \arctg\left(\frac{OO' - X}{Z}\right); \quad (3.3)$$

$$\omega_{min} = \omega_{max} \pm \arctg\left(\frac{X_{2max}}{f}\right). \quad (3.4)$$

Из рисунка 3.3, можно найти координаты точки М по следующим формулам [50]:

$$\begin{aligned} Z &= fb/(X_1 - X_2); \\ X &= b \frac{X_1 + X_2}{2(X_1 - X_2)} + \frac{b}{2}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Тогда погрешность измерения системы представляется в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta Z &= \frac{fb}{(X_1 - X_2)^2} dx, \\ \Delta X &= b \frac{X_1}{(X_1 - X_2)^2} dx, \end{aligned} \quad (3.6)$$

Где b – величина стереобазы, $b=OO'$.

Из уравнений (3.6) видно, что погрешность измерения системы уменьшается при увеличении расстояния между камерами.

Погрешность измерения стереоскопической системы зависит от величины дистанции от системы до исследуемого объекта и представляется в следующем виде:

$$\frac{\Delta d}{d} > \frac{1}{N} \frac{d}{b} \operatorname{tg} \frac{\varphi_{max}}{2}. \quad (3.7)$$

где:

d – величина дистанции от системы до исследуемого объекта,

b – величина стереобазы системы,

φ_{max} - поле зрения камеры,

N – разрешение камеры в строке (столбце).

Как видно из формулы (3.7), погрешность измерения стереоскопической системы в зависимости от дистанции от системы до исследуемого объекта пропорциональна квадрату дистанции до объекта [76,77].

3.2.2. Результаты анализа погрешности измерения стереоскопической системы в среде Matlab и на физической модели

Как сказано выше, стереоскопическая система состоит из двух камер. Модель каждой камеры представляется как камера-обскура [50]. Параметры каждой камеры описываются матрицей A .

$$A = \begin{bmatrix} \frac{f}{w} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{f}{h} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где f – фокусное расстояние;

w , h – масштабы вдоль осей ox , oy (например, расстояния между ячейками матричного фотоприемника вдоль строк и столбцов);

u_0 , v_0 – координаты главной точки относительно начала координат фотоприёмника.

При известных параметрах каждой камеры стереоскопической системы, мы можем генерировать матрицы A_1 и A_2 для левой и правой камер.

Для пространственной точки M с координатами (X, Y, Z) в системе координат левой камеры, координаты ее изображения v' на плоскости изображения левой камеры определяются:

$$v' = A_1 * M.$$

Параметры стереоскопической системы описываются вектором переноса t и матрицей поворота R .

Координаты пространственной точки M в системе координат правой камеры определяются

$$M_1 = R * M + t,$$

И координаты ее изображения v'' на плоскости изображения правой камеры определяются:

$$v'' = A_2 * M_1.$$

Погрешность определения координат сопряженных точек в стереопаре обычно происходит в изображении правой камеры. Погрешность определения координат сопряженных точек по оси ОХ и ОУ соответственно равны Δx и Δy . С учетом погрешности определения координат сопряженных точек в стереопаре, координаты изображения пространственной точки М в изображении правой камеры определяются:

$$v'' = A_2 * M_1 + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Если известны координаты изображений на плоскостях изображений камер v' и v'' , координаты объекта в пространстве можно найти с помощью следующих формул:

$$\begin{bmatrix} Z' \\ Z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v'^T A_1^{-T} A_1^{-1} v' & -v'^T A_1^{-T} R^T A_2^{-1} v'' \\ -v'^T A_1^{-T} R^T A_2^{-1} v'' & v''^T A_2^{-T} A_2^{-1} v'' \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -v'^T A_1^{-T} R^T \\ v''^T A_2^{-T} \end{bmatrix} t,$$

$$M' = Z' A_1^{-1} v', M'' = Z'' A_2^{-1} v''.$$

С помощью вышесказанного математического описания, в среде Matlab разработана компьютерная модель стереоскопической системы для анализа ее погрешности при фиксированной погрешности определения координат сопряженных точек в стереопаре.

Результаты исследования погрешности измерения стереоскопической системы на математической модели в среде Matlab

На основании компьютерной модели стереоскопической системы, построенной в среде MatLab, представлена стереоскопическая система, состоящая из двух одинаковых камер со следующими параметрами:

- фокусное расстояние оптической системы каждой камеры $f=12\text{мм}$;
- размер пикселя $w=h=2,2\text{мкм}$;
- координаты главной точки относительно начала координат фотоприёмника $u_0=1068, v_0=801$;
- разрешение фотоприемника 2136×1602 пикселей.

При исследовании зависимости погрешности измерения стереоскопической системы от угла расположения камер, величина стереобазы составляла 200мм , координаты исследуемой точки $M=(274,-72,2900)$, погрешность определения сопряженной точки составляла величину 1 пиксель, угол визирования между камерами изменяется от -180 градусов до 180 градусов.

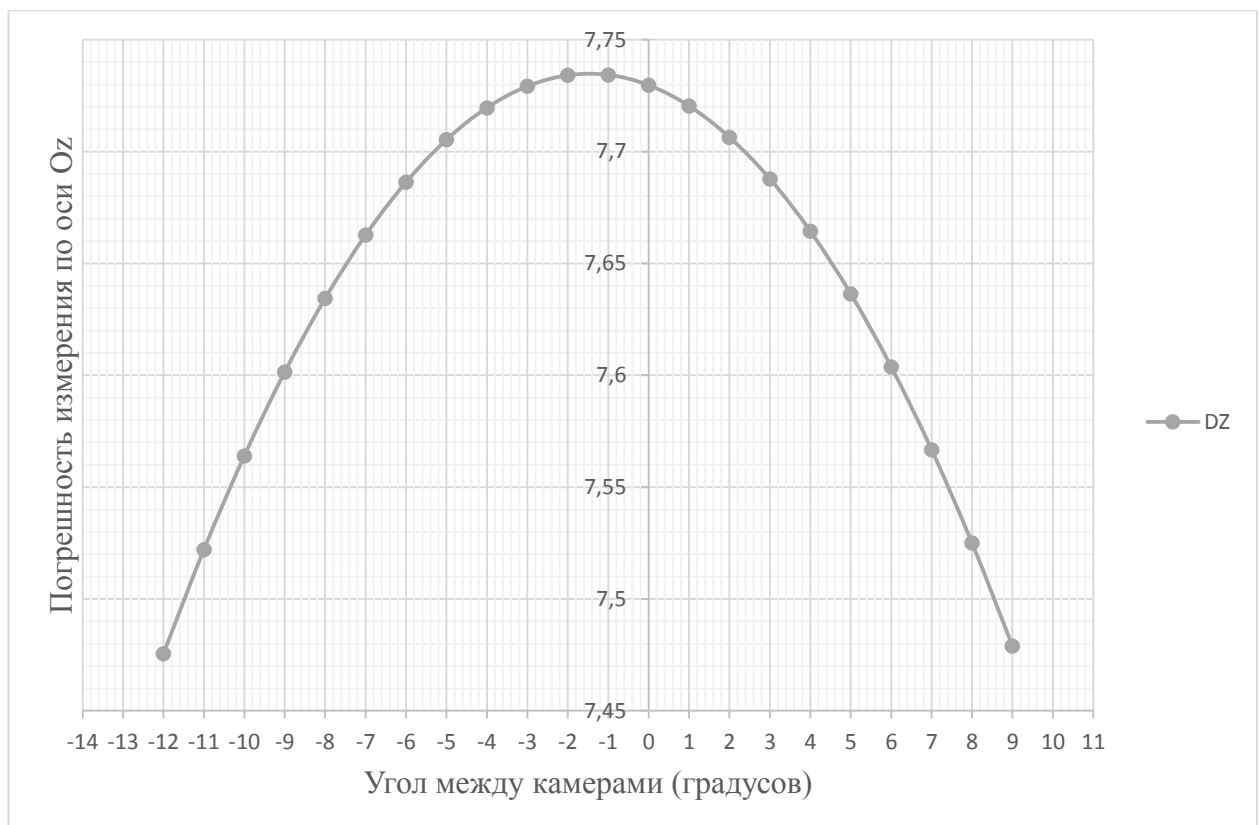


Рис. 3.4 Зависимость погрешность измерения от угла расположения между камерами

Рассчитанная по формуле (3.3) для данной исследуемой точки стереоскопической системы, погрешность измерения системы получает максимальное значение при повороте второй камеры на угол $\omega_{max} = \text{actg}\left(\frac{-74}{2900}\right) = -1,46$ градусов. Рассчитанная по формуле (3.3), погрешность измерения системы получает минимальное значение при угле поворота второй камеры:

$$\omega_{min} = -1,46 \pm \text{actg}\left(1068 * \frac{0,0022}{12}\right) = -1,46 \pm 11,08 \text{ градусов.}$$

Эти результаты приведены на рисунке 3.4. Следует отметить, что теоретические результаты совпадают с результатами, полученными на компьютерной модели стереоскопической системы.

Была также исследована погрешность измерения стереоскопической системы в зависимости от расстояния между камерами. Угол между камерами равен 0, соответственно две камеры параллельны друг другу. При этом исследуемая точка имеет координаты $M=(274,-72,2900)$, расстояние между камерами изменяется от 122мм до 391мм, погрешность определения сопряженной точки равна 1 пикселю.

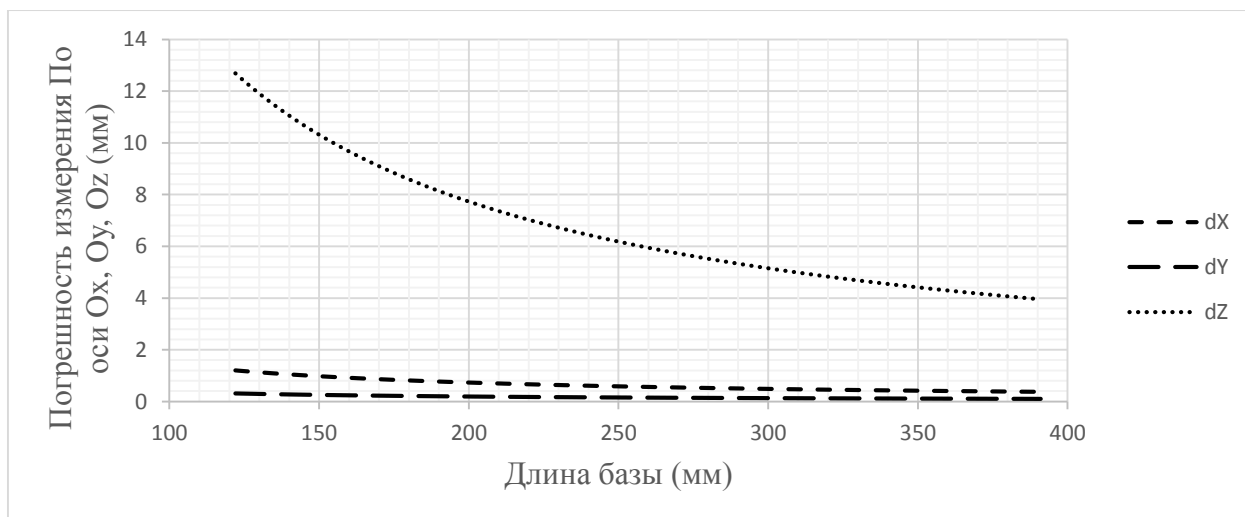


Рис. 3.5 Зависимость погрешности измерения от расстояния между камерами

Как показано на рисунке 3.5, погрешность измерения стереоскопической системы уменьшается при увеличении расстояния между камерами. И теоретические результаты также совпадают с результатами математического моделирования.

В ходе математического моделирования была исследована погрешность измерения стереоскопической системы в зависимости от дистанции от системы до исследуемого объекта. Угол визирования между камерами в этом случае был равен 0, то есть оптические оси двух камер были параллельны друг другу. В процессе моделирования дистанция от исследуемой точки М до системы изменялась в пределах от 1500 мм до 3000 мм. Величина стереобазы при моделировании задавалась 400 мм, а погрешность определения сопряженной точки соответствовала величине 1 пиксель.

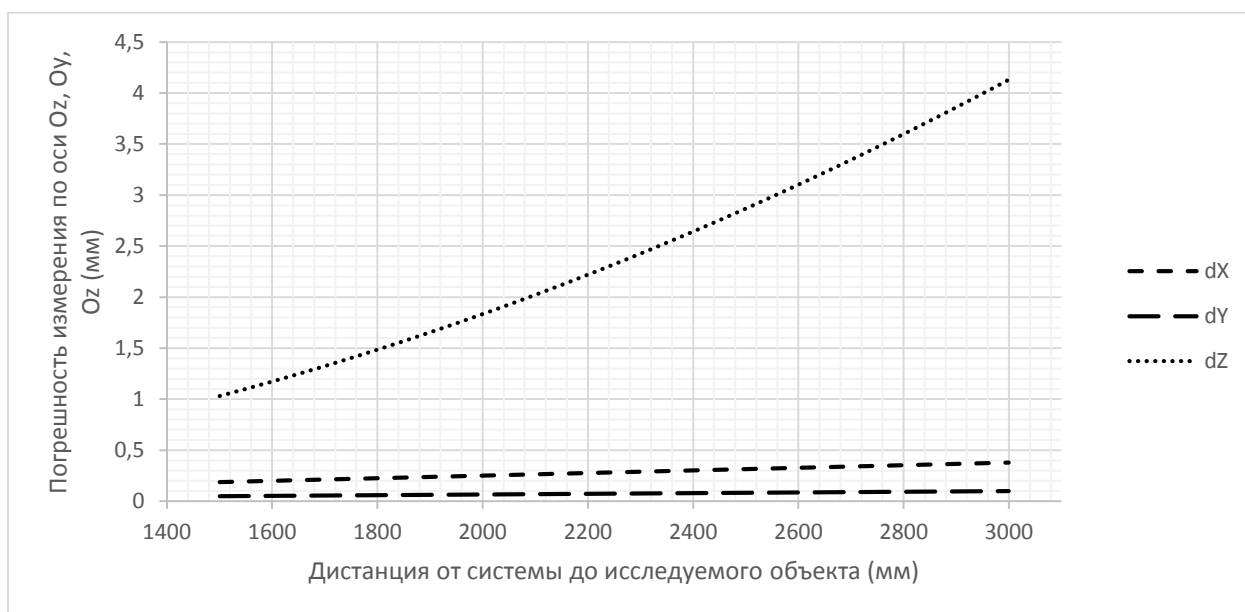


Рис. 3.6 Зависимость погрешности измерения от дистанции от системы до исследуемого объекта

Результаты исследования погрешностей стереоскопической системы на физической модели

В физической модели стереоскопической системы используются две камеры EVSVTC-545-USB со следующими параметрами:

- разрешение 2136x1602 пикселей,
- размер одного пикселя 2,2мкм,
- фокусное расстояние оптической системы камеры равно 12мм.

Для определения погрешности измерения стереоскопической системы в зависимости от величины стереобазы, последняя изменялась от 112мм до 391мм. В процессе измерений использовались координаты 16 точек, затем на изображении правой камеры была программно добавлена погрешность определения сопряженных точек с величиной, соответствующей 1 пикселю. Затем были переопределены координаты таких 16 точек. В результате было получено среднее значение погрешности измерения по оси Ox , Oy , Oz (Рис. 3.7).

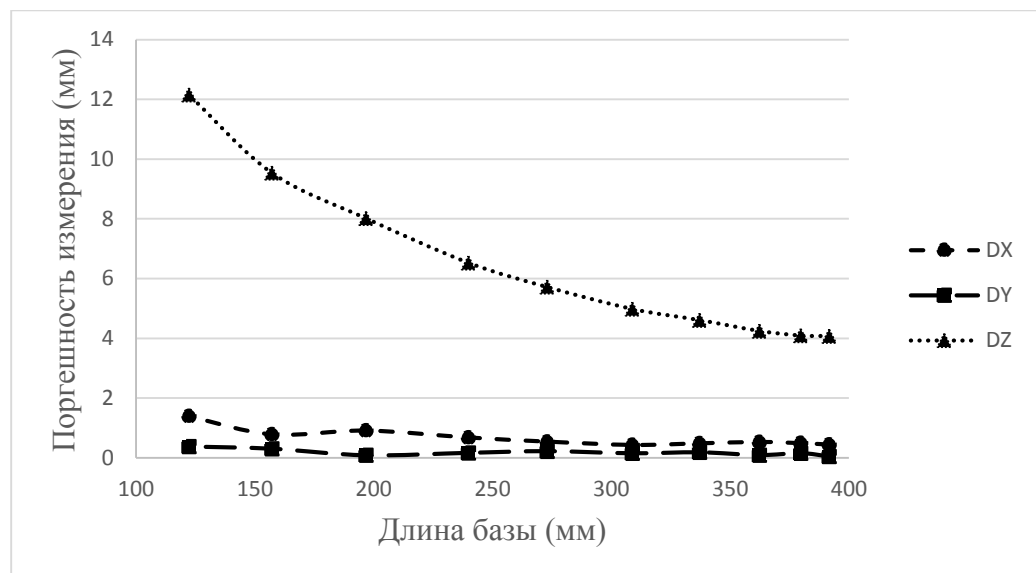


Рис. 3.7 Зависимость погрешности измерения от величины стереобазы

Для определения зависимости погрешности измерения стереоскопической системы от величины дистанции от системы до исследуемого объекта использовалась вышеописанная система с величиной стереобазы равной 391мм. При этом, исследуемый объект находился на расстоянии от системы в диапазоне от 2247мм до 2972мм с шагом 50мм.

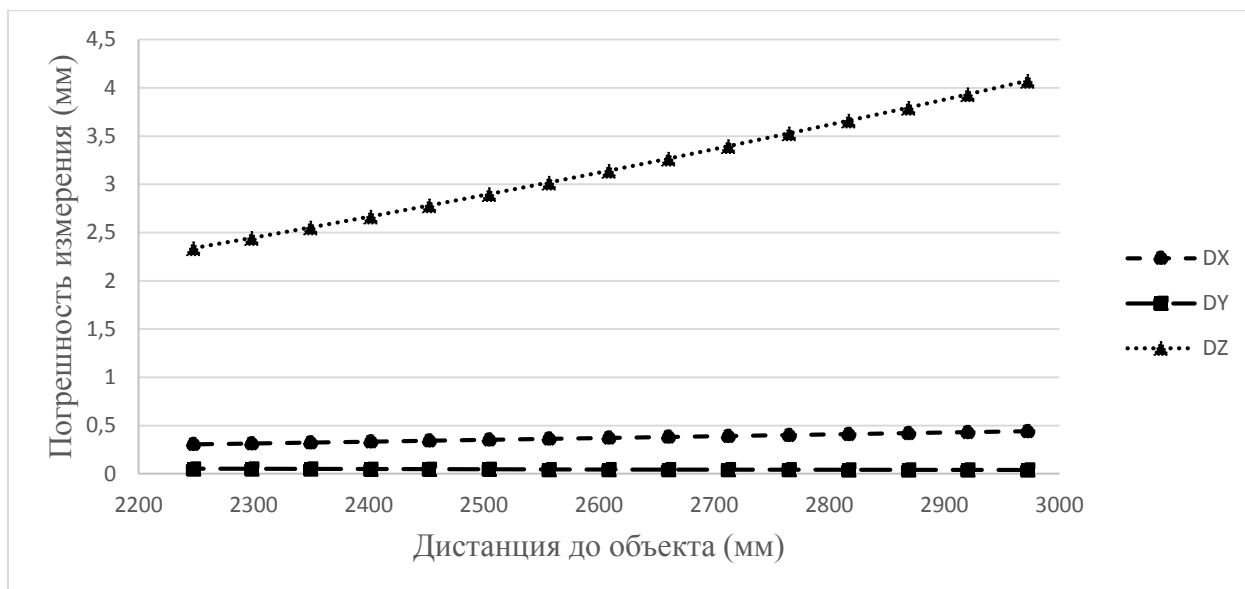


Рис. 3.8 Зависимость погрешности измерения от дистанции от системы до исследуемого объекта

Полученные результаты совпадают с результатами, полученными на математической модели, и подтверждают теоретическое обоснование (Рис.3.8).

Из теоретического исследования видно, что погрешность измерения стереоскопической системы уменьшается с увеличением стереобазы.

При повороте одной камеры вокруг оси o_u погрешность измерения системы получается максимальной, если исследуемая точка находится на оси oz данной камеры, и минимальной, если исследуемая точка находится на краю поля зрения данной камеры.

При изменении дистанции от системы до объекта, погрешность измерения стереоскопической системы пропорциональна квадрату дистанции до объекта. Математическая модель стереоскопической системы была создана с помощью пакета MatLab и результаты исследования этой модели подтверждают теоретические результаты. Проведено также исследование на физической модели, и результаты физического эксперимента подтверждают результаты, полученные на математической модели.

По результатам исследования погрешности стереоскопической системы следует, что при ее построении необходимо выбрать максимально возможную длину стереобазы и камеры находятся под углом соответственно формуле (3.3).

3.3.Методика расчета основных геометрических параметров активной стереоскопической системы безопасности автомобиля

Наиболее серьезное влияние на тяжесть аварии при изменении скорости, приходится на дороги с низкими допустимыми скоростями. Это городские дороги [78]. В данном параграфе, представляются формулы и габаритные параметры активной стереоскопической системы для автомобиля, который движется в городе. Максимальная допускаемая скорость в городе составляет 60км на час.

Сначала необходимо определить угловое поле оптической системы. Эта величина зависит от скорости движения автомобиля, скорости движения опасного объекта, времени его обнаружения системой безопасности. Угловое поле оптической системы можно определить с помощью следующего расчета.

Тормозной путь автомобиля определяется по следующей формуле [79]:

$$S = \frac{K_3 V^2}{254 \Phi_c},$$

где S – тормозной путь автомобиля в метрах,

K_3 – тормозной коэффициент, который равен 1 у легкового автомобиля,

V – скорость автомобиля (в км/ч) в начале торможения,

Φ_c – коэффициент сцепления с дорогой (разные показатели в зависимости от погодных условий).

Таблица 3.1

Тип покрытия дороги	Φ_c
сухой асфальт	0.7
мокрая дорога	0.4
укатанный снег	0.2
обледенелая дорога	0.1

Пусть время обнаружения объекта системой безопасности автомобиля равно $t(c)$. Тогда, путь, через который автомобиль проехал за такое время равно

$$S_1 = \frac{V*1000}{3600} * t.$$

Чтобы проехать путь с длиной S_1+S , автомобилю надо время $T(c)$

$$T = \frac{(S+S_1)*3600}{V*1000}.$$

За время T , которое объект движется со скоростью $v(км/ч)$ может проехать путь $s(м)$

$$s = \frac{v*1000}{3600} * T.$$

Следовательно, ширина обзорной зоны на расстоянии $S+S_1$ должна превышать значение $2(s+d)$, где d –ширина автомобиля. Угловое поле оптической системы должно превышать $2\arctg(\frac{s+d}{S+S_1})$.

На основе вышеуказанных формул, для автомобиля, двигающегося со скоростью $60км/ч$ и объекта в виде человека, который движется со скоростью $20км/ч$, ширина автомобиля равна $1,5м$, время обнаружения системы безопасности равно $1с$, а угловое поле оптической системы должно превышать 44 градусов.

Далее необходимо определить временную и пространственную частоты сканирования лазерного луча в активной стереоскопической системе. Эта величина зависит от ширины опасного объекта и времени обнаружения объекта в активной стереоскопической системе.

Пусть ширина опасного объекта равна $d_{об}$, тогда по теореме Котельникова, расстояние между лазерными линиями в соседних кадрах и расстоянии $S+S_1$ должно меньше или равно значению d_l

$$d_l = \frac{d_{об}}{2}.$$

И, следовательно, угол между лазерными линиями в соседних кадрах равен

$$\varphi_l = \arctg\left(\frac{d_{об}}{2(S+S_1)}\right).$$

Для сканирования всей исследуемой зоны, количество кадров определится следующим образом:

$$n_{кд} = \frac{2\arctg\left(\frac{s+d}{S+S_1}\right)}{\varphi_l} + 1,$$

а временная частота сканирования равна

$$f_{кд} = \frac{n_{кд}}{t}.$$

На основе вышеуказанных формул для объекта с шириной 20см, $d_l = 10$ см, $\varphi_l = 0,16^\circ$, получаем $n_{кд} = 314, f_{кд} = 314$ (Гц), т.е. надо выбрать камеру со скоростью смены кадров не менее 314к/с. Не представляет особой сложности найти камеры с такой скоростью и доступной ценой, например, камера **fps1000 SILVER**, которая обеспечивает скорость 840 кадров/с при разрешении 640x480 пиксель, а цена камеры составляет порядка 500 \$ США [80].

Дальше, нам необходимо определить схему расположения камер в стереоскопической системе и фокусное расстояние оптической системы каждой камеры, а также их относительное расположение между камерами. Как мы уже знаем, погрешности измерения стереоскопической системы зависят от длины стереобазы. Чем больше длина стереобазы, тем точнее результат измерения стереоскопической системы [50]. Длина стереобазы также ограничена шириной объекта, на котором стереоскопическая система расположена. В качестве системы безопасности стереоскопическая система может быть установлена на автомобиле и при этом ширина автомобиля составляет величину от 1500мм до 2500мм. Необходимо выбрать максимальную возможную длину стереобазы d . По величине угла между оптическими осями камер можно разделить стереоскопические системы на 3 типа: конвергентный, нормальный и параллельный [75]. В результате расчета погрешностей измерения показано, что системы параллельного типа всегда уступают системам нормального типа [74]. Далее мы рассмотрим погрешности измерения стереоскопической системы нормального и конвергентного видов при фиксированной длине стереобазы и погрешности определения координат сопряженных точек. Для анализа погрешности измерения этих двух видов стереоскопической системы, была построена математическая модель в среде Matlab.

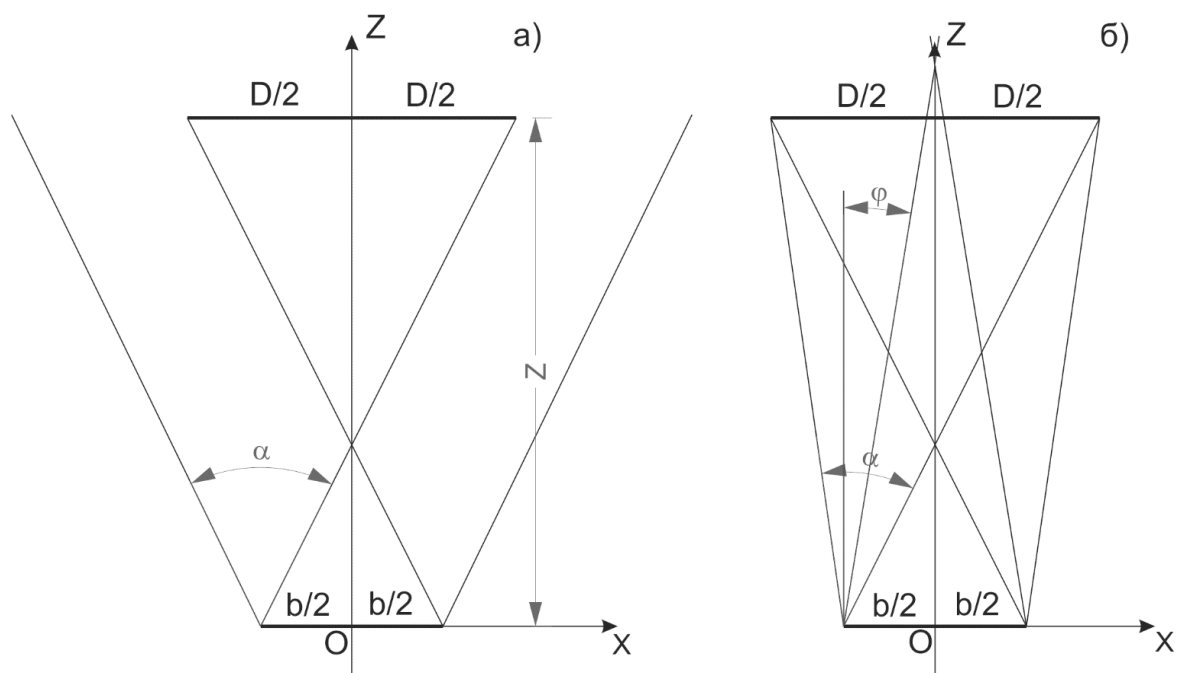


Рис. 3.9 Схема стереоскопической системы. а) нормальный вид, б) конвергентный вид.

При фиксированном положении зоны наблюдения фокусное расстояние оптической системы f каждой камеры стереоскопической системы нормального вида определяется следующей формулой:

$$f = \frac{Z \cdot \frac{d}{2}}{\frac{D}{2} + \frac{b}{2}};$$

Где, d - ширина приемной матрицы ПЗС;

D – размер зоны пространства предметов;

Z – расстояние от стереоскопической системы до исследуемой зоны пространства предметов;

b – величина стереобазы.

Угол между двумя камерами $\omega = 0^\circ$.

По результатам анализа схемы стереоскопической системы конвергентного вида (рис. 3.9, б), фокусное расстояние оптической системы каждой камеры f , угол поворота первой камеры φ , и угол между камерами ω стереоскопической системы конвергентного вида определяется следующими формулами:

$$f = \frac{d}{2} \left[\operatorname{tg} \left(\frac{180^\circ - \operatorname{arctg} \left(\frac{Z}{\frac{D}{2} + b/2} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{Z}{\frac{D}{2} - b/2} \right)}{2} \right) \right]^{-1},$$

$$\omega = 180^\circ - 2 * \operatorname{arctg} \left(\frac{d}{2f} \right) - 2 * \operatorname{arctg} \left(\frac{Z}{\frac{D}{2} + b/2} \right),$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{d}{2f} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{\frac{D+b}{2}}{Z} \right).$$

По этим параметрам мы можем определить матрицу внутренних параметров каждой камеры, матрицу поворота камеры и вектор переноса стереоскопической системы. При указании координат точек в пространстве [50], мы можем определить координаты точек в стереопаре. Если указать величину ошибки определения координат сопряженных точек, мы можем определить погрешность определения координат таких точек в пространстве.

Математическая модель стереоскопической измерительной системы для исследования погрешности систем конвергентного и нормального видов реализована в среде MatLab. В модели выбраны параметры матрицы ПЗС с размером 12,8x9,6мм; $d = 1500$ мм, $D = 30000$ мм и $Z=36000$ мм. Получаем для нормального вида: $f=15,01$ мм. Для конвергентного вида $f=15,9$ мм; $\omega = 1,33^\circ$; $\varphi = 0,67^\circ$. Погрешность определения координат сопряжённых точек составляет 0,5 пикселя вертикально, и 0,1 пикселя горизонтально. Погрешности измерения по дистанции представлены на рис.3.10.

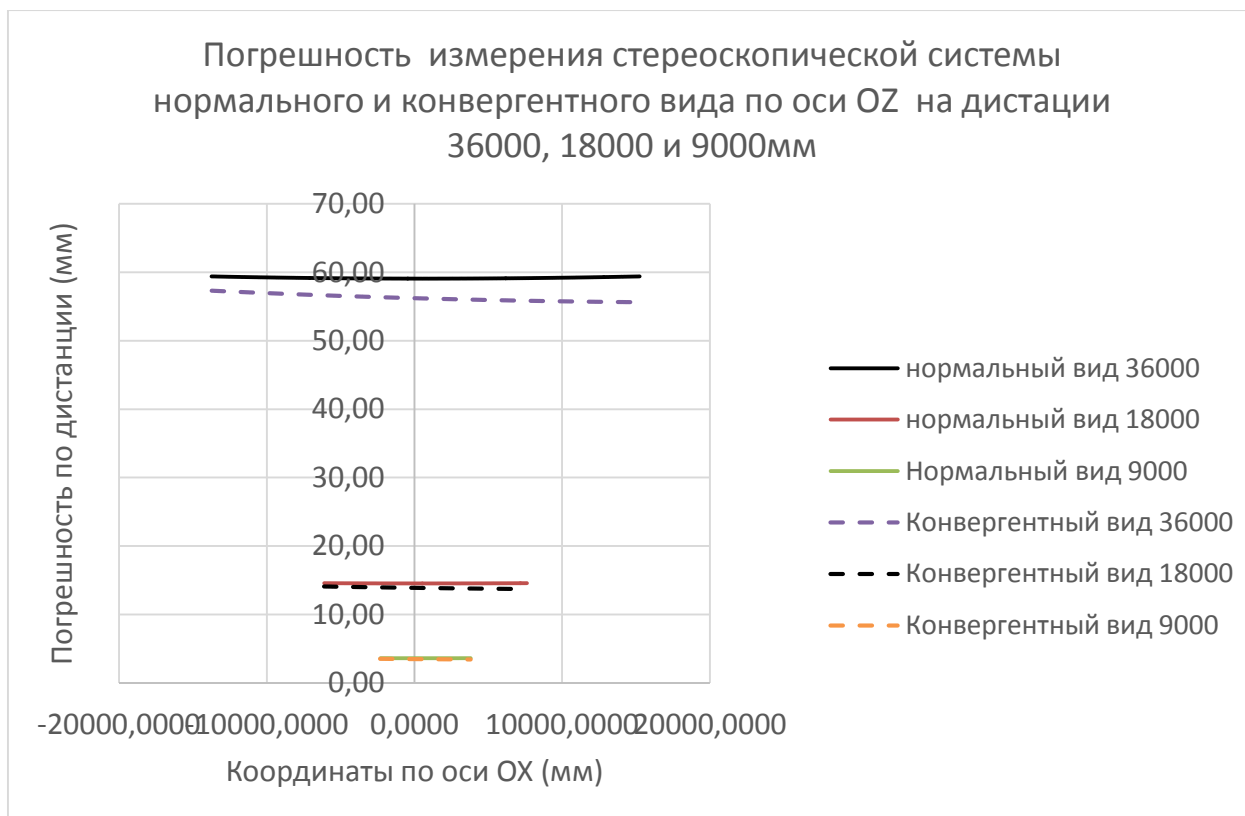


Рис.3.10. Погрешности измерения по дистанции стереоскопической системы нормального вида и конвергентного вида.

По результатам исследований на математической модели видно, что при наблюдении одного и того же участка с фиксированной величиной стереобазы и погрешностью определения сопряженных точек, погрешности измерения стереоскопической системы конвергентного вида меньше, чем для системы нормального вида. Это можно объяснить тем, что в системе конвергентного вида оптическая система имеет большее фокусное расстояние. В итоге, для исследования определенного участка с фиксированной длиной базы и погрешностью определения сопряженных точек в стереопаре, лучше выбрать конвергентный вид стереоскопической системы [81].

По результатам вышеприведенного анализа видно, что стереоскопическая система конвергентного вида имеет лучший результат измерения чем нормального вида.

После получения параметров оптической системы камеры, необходимо определить угол расходимости лазерного луча. Как показано в анализе работы лазерного дальномера [п.1.4.3.1] [82], изображение лазерного луча на плоскости изображения камеры должно быть примерно равно размеру фоточувствительного элемента. Размер элемента $d_{\text{элемент}}$, как правило, много меньше чем фокусное расстояние оптической системы камеры f . Поэтому угол расходимости лазерного луча $\Delta\delta$ можно определить по следующей формуле:

$$\Delta\delta = \frac{d_{\text{элемент}}}{f}.$$

3.4.Выводы по главе 3

В данной главе представлен анализ схемы построения активной стереоскопической системы, а также методика расчета ее параметров. Для решения задачи определения сопряженных точек в стереоскопической системе предложено использовать лазерный сканнер. Координаты сопряженных точек определяются путем измерения координат точек пересечения эпиполярной линии с лазерной линией.

Проведено исследование погрешности АСОЭС в зависимости от длины стереобазы, и схемы расположения видеокамер АСОЭС при фиксированной погрешности определения сопряженных точек в стереопаре. В зависимости от длины стереобазы, по результатам известного теоритического исследования и исследования на физической модели стереоскопической системы показано, что чем больше длины стереобазы, тем лучше результат измерения стереоскопической системы. В зависимости от схемы расположения, при повороте второй камеры относительно первой, имеются положения, где погрешность измерения стереоскопической системы минимальна. При исследовании одной и той же сцены, две параллельные камеры не всегда дают лучший результат измерения.

Разработана методика габаритного расчета АСОЭС. В методике габаритного расчета АСОЭС предложены формулы расчета углового поля оптической системы, угол между камерами, фокусное расстояние оптической камеры каждой камеры, скорость смены кадров камеры, угол расходимости лазерного луча, длина стереобазы выбрана максимальна.

По результатам габаритного расчета АСОЭС, в среде Matlab проведено исследование погрешности измерения стереоскопической системы нормального вида и конвергентного вида при исследовании одной сцены, с фиксированной погрешности определения координат сопряженных точек в стереопаре и длине стереобазы. По результатам исследования показано, что конвергентный вид стереоскопической системы дает лучший результат измерения по сравнению с результатами измерения нормального вида стереоскопической системы. В итоге, выбран конвергентный вид стереоскопической системы для АСОЭС.

4. Методика обработки изображения активной стереоскопической системы с целью применения в активной системе безопасности автомобиля

В соответствии с принципом работы активной стереоскопической системы (п. 3.1), для применения активной стереоскопической системы в качестве системы безопасности автомобиля, необходимо обрабатывать изображения, полученные камерами стереоскопической системы. В блоке предварительной обработки необходимо выделить координаты лазерных линий в стереопаре. В ЭВМ необходимо рассчитать трехмерные координаты всех объектов в наблюдаемой сцене, выделить объекты и определить их скорости и траектории движения, выводить предупреждения водителю.

В этой главе предлагаются принципы работы блока предварительной обработки изображения и методу восстановления трехмерного изображения сцены, а также алгоритмы выделения объектов из сцены и определения их скорости, траектории движения.

Исследования проводились с использованием физической модели активной стереоскопической системы, включающей в себя две камеры, управляемый лазер и макет сцены. Алгоритмы реализованы на ПК в среде MatLab.

4.1. Предварительная обработка изображений

На этапе предварительной обработки изображения (рис.4.1), необходимо выделить изображение отраженного от объекта лазерного луча в условиях фоновой засветки. В данной работе использована межкадровая фильтрация. Из-за того, что скорость смены кадров камеры во много раз больше чем скорость движения объектов в двух соседних кадрах, на полученных с камер изображениях двигается только лазерный луч. Чтобы отделить отражение лазерного луча от фона для каждого пикселя вычитается значение его яркости в текущем кадре из значения яркости того же пикселя предыдущего

кадра. Если полученный результат меньше нуля, конечный результат будет 0. На рисунке 4.1.а показано исходное изображение, полученное с левой камеры.

Результат межкадровой фильтрации показан на рисунке 4.1.б. После получения области, где есть отражение лазерного света на объекте, на каждой строке необходимо найти центр лазерного луча. Чтобы решить эту задачу, на каждой строке находим пиксель, яркость которого имеет максимальное значение на данной строке. После получения координат такой точки, возвращаемся к исходному изображению и находим реальный максимум по яркости, который находится в зоне первого максимума, и в области лазерного луча. В результате получается реальный максимум. Далее находим все пиксели, которые находятся вокруг реального максимума и имеют яркость больше или равную 75% яркости реального максимума. На рисунке 4.1.в показана диаграмма распределения яркости строки номер 544, реальный максимум (красная точка) и зона, где величина яркости больше или равна 75% величины яркости реального максимума (зона, внутри пунктирной красной линии). По величинам яркости этих пикселей построим полигон и получим центр изображения лазерного луча на данной строке. Используя метод определения энергетического центра тяжести или метод наименьших квадратов, можно оценить положение центра с точностью до одной десятой размера пикселя [83]. На рисунке 4.1.г показан вычисленный полигон (зеленная кривая) и центр тяжести лазерного луча на строке номер 544. На этом этапе завершается процесс предварительной обработки изображения. Вся информация о координатах точек в линий лазерного луча в стереопаре отправляется в ЭВМ для вычисления трехмерных координат объектов в наблюдаемой сцене.

Из-за движения объекта, в полученном изображении происходит смазывание. Чтобы уменьшить влияние смазывания на результат определения координат лазерной линии, в качестве приемника можно

использовать КМОП фотоприемник в режиме бегущего электронного затвора [84] и фильтрацию Винера [85] в процессе обработки изображения для восстановления изображения от смаза.

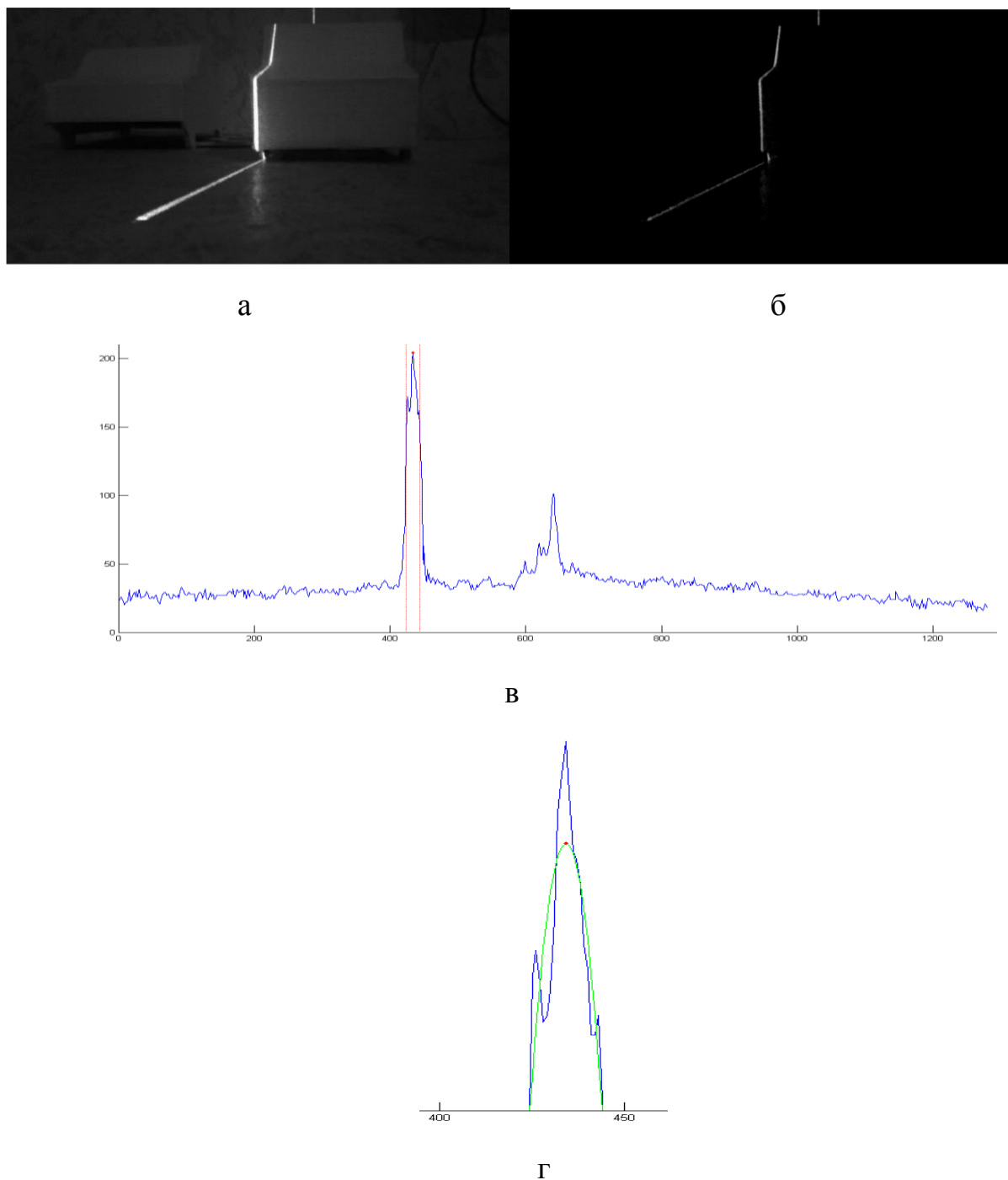


Рис.4.1 Результат обработки изображения в блоке предварительной обработки, а – исходное изображение, б – результат межкадровой обработки, в – диаграмма распределения яркости на строке 544, г – результат определения центра тяжести на строке 544

4.2. Методика получения трехмерных координат объектов в активной стереоскопической системе

Как мы уже знаем, с помощью стереоскопической системы можно получить информацию о положения объектов в пространстве. После процесса калибровки получены матрицы внутренних параметров каждой камеры стереоскопической системы A_1 и A_2 , а также вектор переноса t и матрица поворота R как внешние параметры стереоскопической системы. Чтобы восстановить трехмерное изображение сцены с движущимися объектами обе камеры стереоскопической системы должны работать синхронно, то есть моменты времени начала накопления для обеих камер должны совпадать. Это процесс обеспечивает блок синхронизатора, который управляется компьютером. После получения изображения с камер необходимо найти сопряженные точки в этой стереопаре. В настоящее время существует много методов для решения этой задачи [51]. Их можно подразделить на глобальные [52,53,54] и локальные методы [55] [56] [57] [58]. Все эти методы требуют больших вычислительных ресурсов и их нельзя применить в быстродействующей системе.

Особенностью сопряженных точек в стереопаре является то, что если известны координаты точки в одном изображении стереопары, ее сопряженная точка в другом изображении всегда находится на эппиполярной линии [73]. Функция эппиполярной линии на другом изображении $v''=(x'',y'')$ имеет следующий вид:

$$a''^T v'' = 0, (*);$$

где $a'' = Fv'$ - вектор коэффициентов,

$F = A_2^{-T} \begin{bmatrix} t \\ 1 \end{bmatrix} R A_1^{-1}$, A_1 , A_2 – матрицы внутренних параметров соответственно первой и второй камер,

R – матрица поворота, t – вектор переноса.

Положение сопряженной точки можно определить путем облучения объектов с помощью сканирующего лазерного луча. Таким образом, стереоскопическая система становится активной. В этом случае сопряженная точка находится на пересечении изображения лазерного луча, отраженного от объекта и эпиполярной линии. При этом полностью решается задача определения сопряженных точек в стереопаре.

После получения координат сопряженных точек в стереопаре, можно получить пространственные координаты объекта в пространстве. Пусть координаты точки с коррекцией дисторсии в левом изображении стереопары описываются вектором v' и координаты ее сопряженной точки в правом изображении стереопары описываются вектором v'' . Трехмерные координаты объекта определяются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} Z' \\ Z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v'^T A_1^{-T} A_1^{-1} v' & -v'^T A_1^{-T} R^T A_2^{-1} v'' \\ -v'^T A_1^{-T} R^T A_2^{-1} v'' & v''^T A_2^{-T} A_2^{-1} v'' \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -v'^T A_1^{-T} R^T \\ v''^T A_2^{-T} \end{bmatrix} t,$$

$$M' = Z' A_1^{-1} v', M'' = Z'' A_2^{-1} v''.$$

Где $M'=(X',Y',Z')$ – трехмерные координаты объекта в системе координат левой камеры,

$M''=(X'',Y'',Z'')$ - трехмерные координаты объекта в системе координат правой камеры.

Для получения пространственных координат всех объектов (точек) в наблюдаемой сцене, требуется длительное время обработки изображения и вычисления эпиполярной линии, определения сопряженных точек и пространственных координат объекта. Чтобы использовать активную стереоскопическую систему в качестве системы безопасности автомобиля, необходимо сократить время обработки информации. Для этого процесс предварительной обработки изображений необходимо выполнить отдельно в

блоке предварительной обработки изображений. Этот блок работает синхронно с камерами.

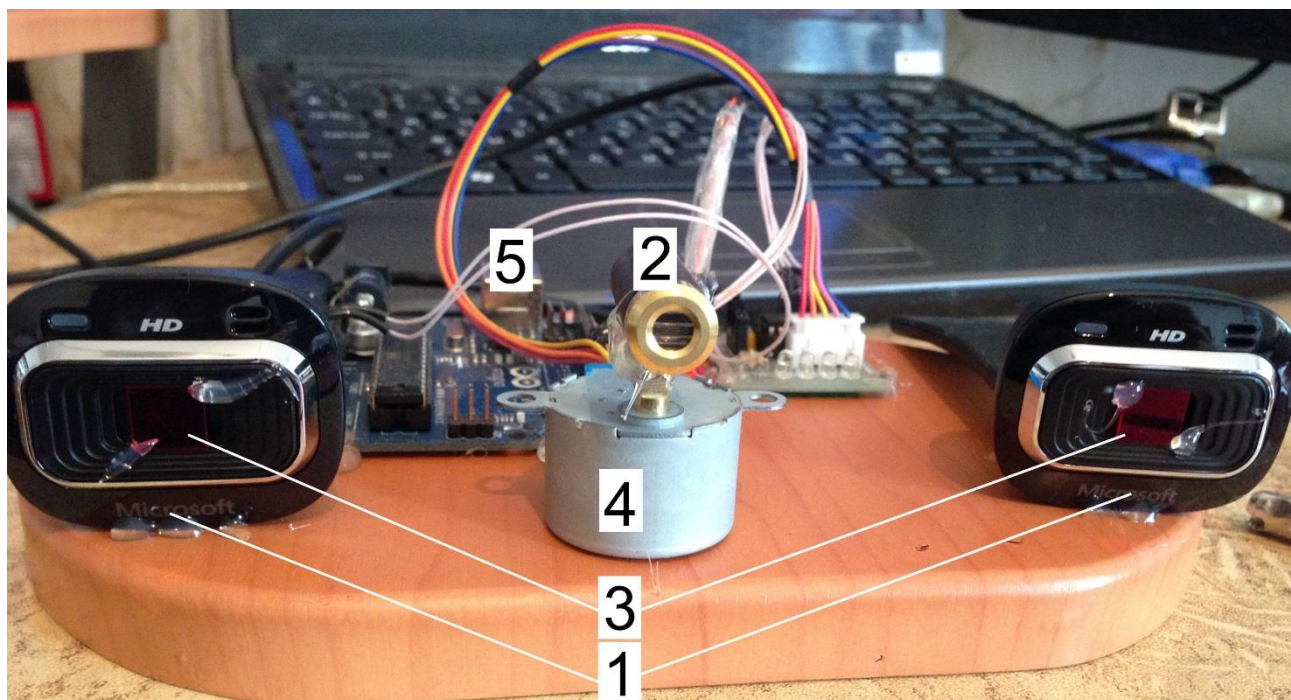


Рис.4.2 Физическая модель активной стереоскопической системы. 1- видео камера, 2- источник лазерного излучения, 3- узкополосные фильтры, 4- шаговый двигатель, 5- блок управления шагового двигателя.

Для проверки работоспособности АСОЭС была построена ее физическая модель(рис.4.2). Модель состоит из двух одинаковых камер (1) и источника лазерного излучения (2) с длиной волны 650нм. Перед камерами установлены узкополосные фильтры с полосой пропускания 650нм (3). Источник лазерного излучения управляется шаговым двигателем (4) и контрольным блоком (5). Контрольный блок и камеры подключаются к компьютеру.

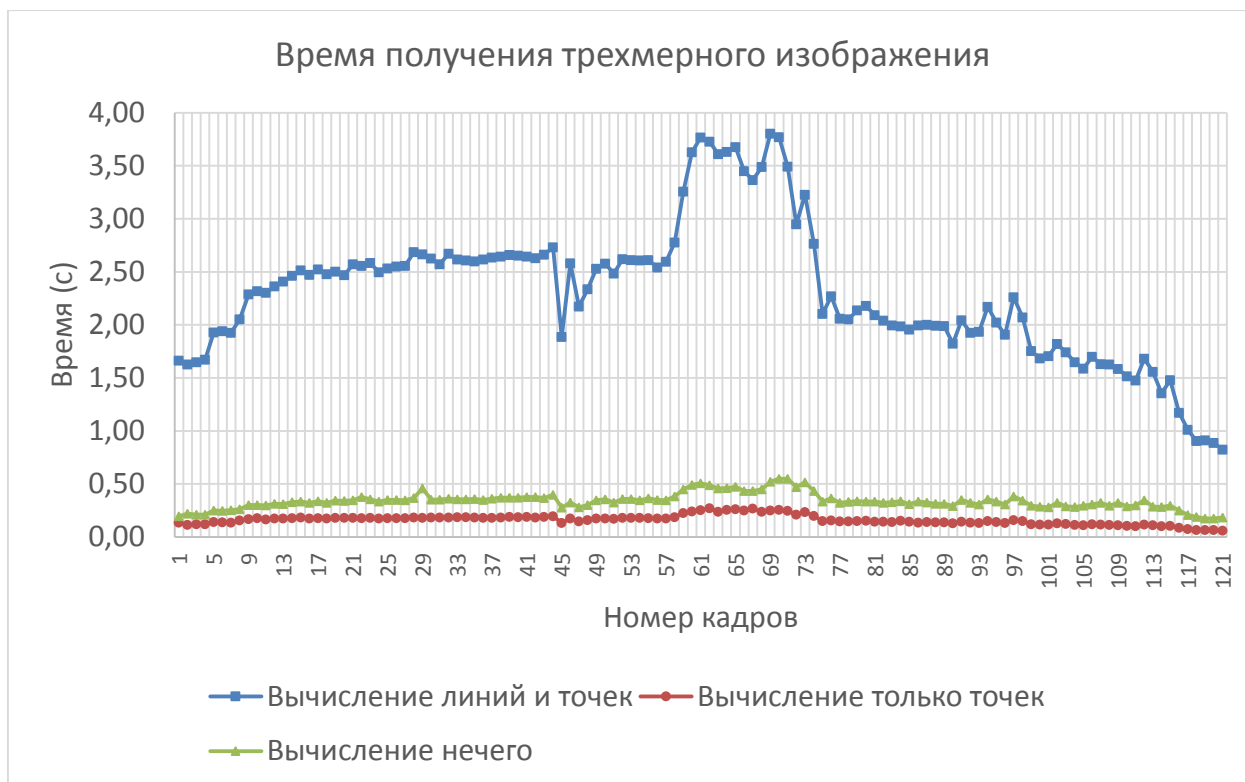


Рис. 4.3. Время получения трехмерных координат точек в наблюдаемой сцене.

Существуют три варианта получения координат сопряженных точек и пространственных координат объектов. Первый вариант: эпполярные линии и трехмерные координаты вычисляют в процессе обработки информации. Второй вариант: все возможные эпполярные линии предварительно вычислены в процессе калибровки стереоскопической системы и сохранены в памяти ЭВМ. Третий вариант: все возможные эпполярные линии и трехмерные координаты всех возможных точек в поле зрения активной стереоскопической системы предварительно вычислены и сохранены в памяти ЭВМ. Первый вариант получения трехмерных координат точек требует большое количество вычисления в процессе обработки информации. В третьем варианте, количество вычисления уменьшается, но требуется ЭВМ с большим объемом памяти. Для выбора подходящего варианта, на физической модели стереоскопической системе был проведен эксперимент измерения времени обработки каждого варианта получения трехмерных

координат точек. Каждый кадр, полученный физической моделью активной стереоскопической системы, обрабатывался 5 раз по каждому варианту и измерено среднее время обработки. ЭВМ построен с процессором Intel Core i3 M350, ОЗУ ЭВМ – 3 ГБ, компьютерная программа реализована в среде Matlab и выполнена в одном потоке команд и данных. Количество кадров – 120, количество точек в 120 кадрах - 46988. Результат измерения представлен в рис. 4.3.

Из рис.4.3, следует, что из-за большего количества вычисления эпиллярных в процессе обработки информации, первый вариант требует время в десять раз больше чем второй вариант. Третий вариант тоже требует время обработки больше чем второй вариант. Это можно объяснить тем, что количество точек большое, и время нахождения координат требуемой точки больше чем время вычисления ее координат. Среднее время обработки каждого кадра второго варианта составляет 0,16с. Это говорит о том, что данный процессор недостаточно быстрый для обеспечения работы активной стереоскопической системы. Для обработки 120 кадров за 1 секунд, компьютерная программа должна работать с большим потоком команд и данных. Пример процессора, который может обеспечивать работу такой компьютерной программы: intel Xeon E7 v2, в котором есть 10 ядер, и который обеспечивает 20 поток команд и данных одновременно.

На основе высшего измерения и анализа, предлагается методика получения трехмерных координат точек для активной стереоскопической системы [86]. В процессе калибровки стереоскопической системы необходимо определить все варианты эпиллярных линий. Эти параметры потом сохраняют в памяти компьютера. В процессе восстановления трехмерного изображения сцены уже не нужно вычислять эпиллярную линию, а можно просто взять их из памяти компьютера. Алгоритм процесса восстановления трехмерного изображения представлен на рисунке 4.4.

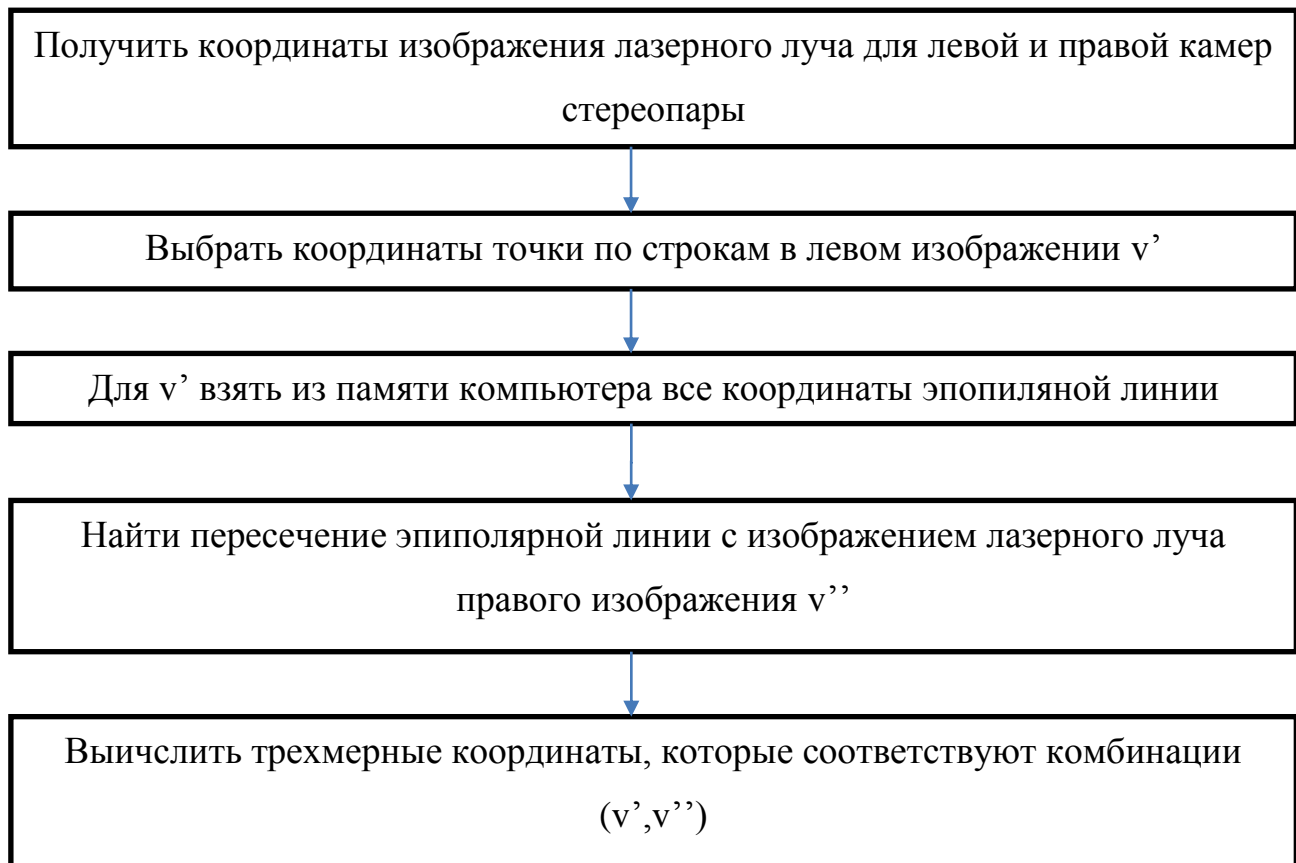
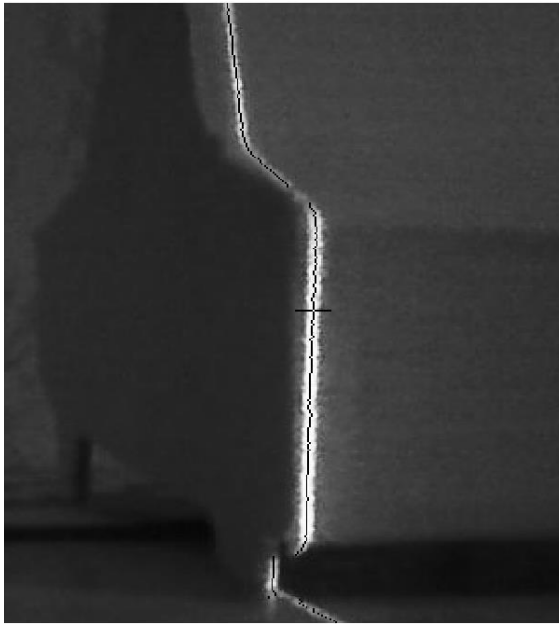
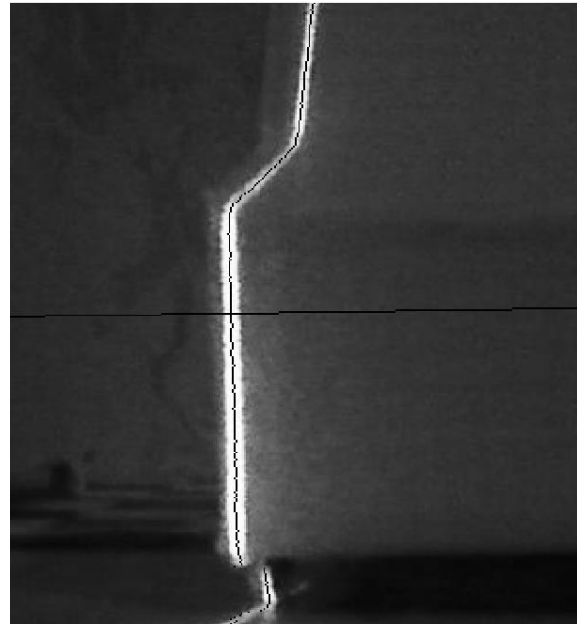


Рис. 4.4. Алгоритм восстановления трехмерного изображения сцены в активной стереоскопической системе

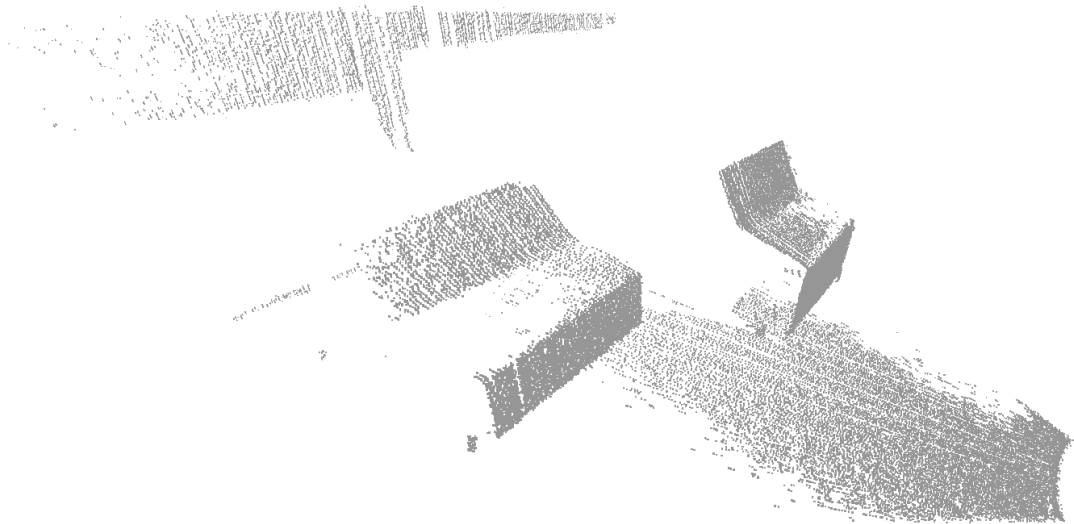
Результат получения трехмерного изображения сцены показан на рисунке 4.5. На рис. 4.5.а показано изображение, полученное левой камерой, с координатами изображения линии движения лазерного луча (вертикальная черная линия) и выбранной точкой (пересечение вертикальной линии и горизонтальной линии). На рис. 4.5.б показано изображение, полученное правой камерой стереопары, с координатами изображения линии движения лазерного луча (вертикальная линия) и эпопилярной линией (горизонтальной линией). Пересечение этих двух линий является сопряженной точкой для выбранной точки в левом изображении. На рис.4.5.в показано трехмерное изображение наблюдаемой сцены.



а



б



в

Рис.4.5 Результат восстановления трехмерного изображения сцены, а – левое изображение с выбранной точкой, б – правое изображение с эпполярной линией и сопряженной точкой, в – трехмерное изображение сцены

Далее, после получения трехмерного изображения сцены с реальными размерами, необходимо выделить из этого изображения все объекты, являющиеся препятствиями для автомобиля.

4.3. Алгоритм выделения объектов из облака точек

После обработки изображений, мы получаем трехмерное изображение сцены в виде облака пространственных точек. Существующие методики выделения объектов из облака пространственных точек [83,84,85,86] требуют больших вычислительных ресурсов, в результате чего их применение затруднено.

На основе известных принципов функционирования АСОЭС [п.3.1] предложен алгоритм выделения препятствия из облака пространственных точек [87]. Сущность алгоритма основана на том факте, что на трехмерном изображении каждого кадра все точки находятся на одной плоскости и объект отличается от дорожного полотна градиентом высоты, т.е. скоростью нарастания высоты объекта. Таким образом, задача предложенного алгоритма выделения препятствия сводится к определению градиента высоты объекта, а также принятию решения, исходя из его порогового значения:

$$G=h/d, \quad (4.1)$$

где G – градиент изменения высоты;

h – разница высот двух точек;

d – расстояние между ними.

Исходя из этого, для облака пространственных точек, полученных в АСОЭС, предложенный алгоритм работает следующим образом.

1. В результате проведения измерений в каждом кадре производится разделение облака пространственных точек по оси направления движения OZ на участки, причем ширина каждого участка равна максимальной ширине углубления d_{\max} , через которое автомобиль сможет проехать (рис.4.6, а).

2. На каждом участке по оси направления движения выбираются первая и последняя точки, а также производится сравнение их соответственно с

первой и последней точками соседних участков. На каждом участке выбираются точки с максимальной и минимальной высотой, определяется градиент высоты G (4.1) и разница по высоте между этими точками.

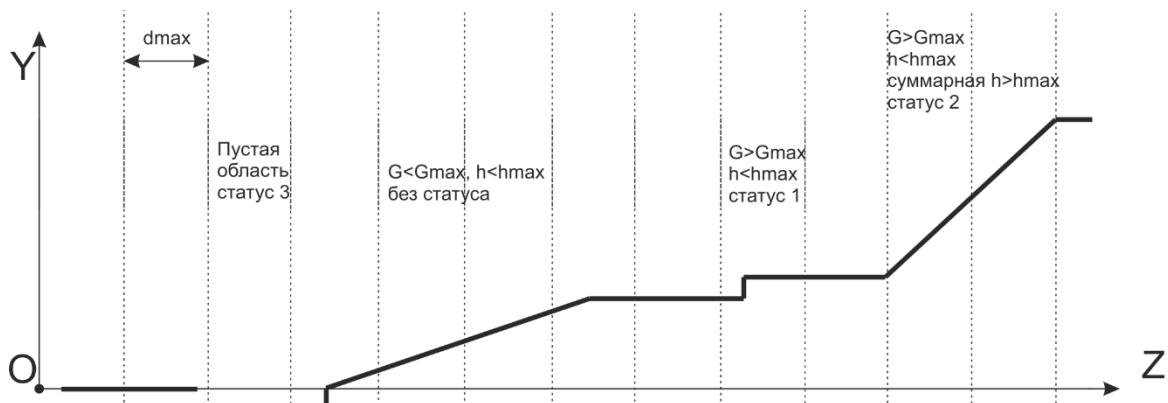
3. Если величина G больше, чем выбранное пороговое значение G_{\max} , то этот участок получает статус «1». Если $G > G_{\max}$ и высота h больше, чем пороговое значение по высоте h_{\max} , этот участок получает статус «2». Если на выбранном участке нет ни одной точки, тогда такой участок получает статус «3».

4. Для двух соседних участков определяется расстояние от последней точки переднего участка до первой точки следующего участка. Если это расстояние больше чем d_{\max} , то эти два участка получают статус «3».

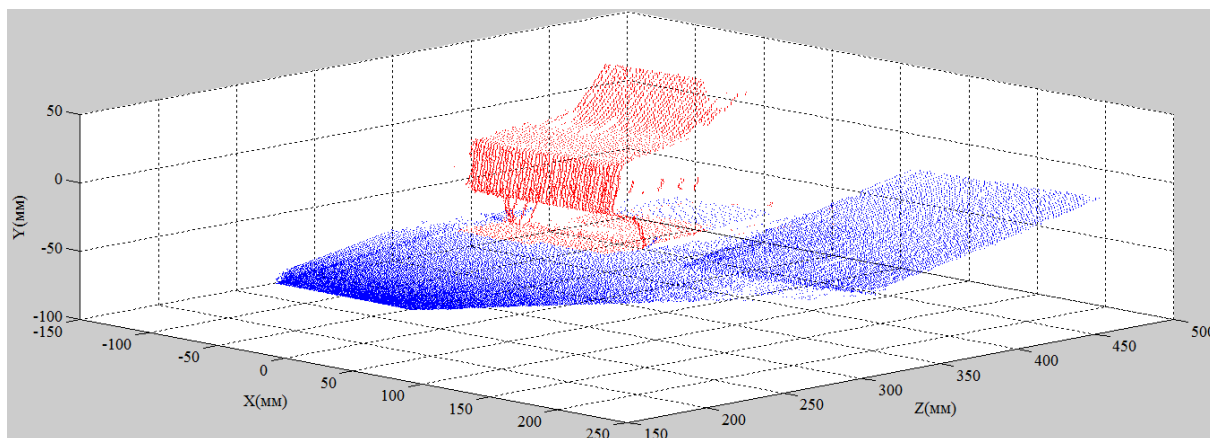
5. Если есть два или более участков с статусом «1» и они находятся друг за другом, необходимо определить суммарную высоту этих участков. Если суммарная высота больше чем h_{\max} , эти участки получают статус «2» (статус «1» – при котором $G > G_{\max}$, но $h < h_{\max}$, в этом случае автомобиль может проехать, но если соседние участки имеют суммарную высоту выше h_{\max} , то автомобиль не сможет их преодолеть).

6. В итоге все участки получают статус «1», «2» или «3», а также присутствуют участки без статуса. Участки со статусами «2» и «3» представляют опасность для проезда автомобиля. Остальные участки – проезжая часть дороги, свободная от препятствий.

Апробация алгоритма проводилась на физической модели, включающей в себя АСОЭС, движущийся макет автомобиля и наклонную поверхность, моделирующую дорогу. В модели использован лазер IE84-05CLF (длина волны 650 нм), две камеры MicrosoftLifeCam HD-5000 с разрешением 1280×780 пикселей. Величина стереобазы 128 мм. Алгоритм обработки результатов съемки реализован в среде MATLAB.



а



б

Рис. 4.6. Графическое представление выделения препятствий: схема
разделения участков дороги

по градиенту высоты (ось OY) с различными статусами в направлении
движения (ось OZ) (а);

графическое представление результата работы алгоритма (б)

Трехмерная картина, полученная с помощью физической модели, после преобразования представляла собой облако из 36842 пространственных точек (рис.4.6, б). Среднее время обработки одного кадра по результатам эксперимента составляет около 0,017 с. Моделирование подтвердило, что разработанный алгоритм устойчиво выделяет на сцене силуэт автомобиля.

Таким образом, показана работоспособность алгоритма, который может быть предложена для использования в автомобильной активной системе безопасности, а также для управления разнообразными подвижными объектами.

На основе результата выделения объектов из сцены мы можем дать водителю предупреждения об опасных расстояниях до передних объектов по направлению движения.

Чтобы дать водителю информацию о возможном столкновении необходимо на основе результатов выделения объектов разделить и распознавать объекты, а также определить их скорости и траектории движения.

4.4.Алгоритм различения объектов друг от друга

После выделения объектов из сцены (рис.4.7), нам необходимо распознавать и определить скорости и траектории движения объектов. Для того, чтобы решить эту задачу, в первую очередь необходимо отделить объекты друг от друга.

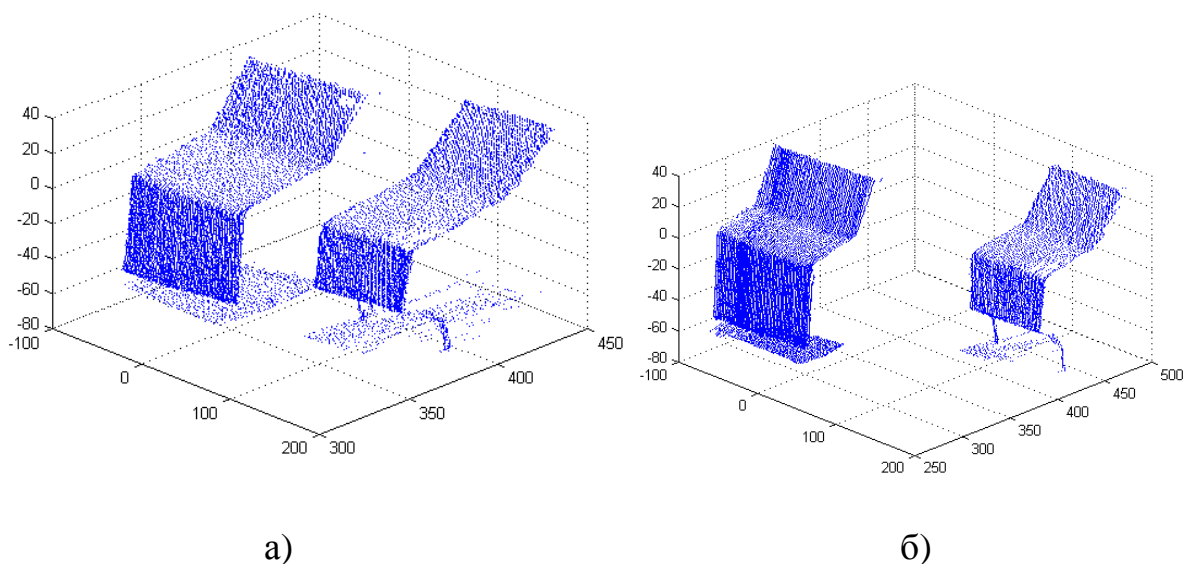


Рис.4.7 Трехмерные изображения двух автомобилей, полученные в результате работы активной стереоскопической системы после их выделения из сцены

Как мы знаем, объекты можно отделить друг от друга при анализе расстояний между точками, составляющими изображения объектов. Расстояния между точками в одном объекте должны быть меньше некоторого порогового значения. Активная стереоскопическая система способна оперировать с трехмерными координатами, включая дальность. Поэтому приходится учитывать тот факт, что расстояния между точками, которые находятся дальше от начала системы координат, больше чем расстояния между точками, которые находятся ближе к началу системы координат. С помощью метода выделения связанных областей на бинарных изображениях [69], можно разделить объекты друг от друга. В результате для того, чтобы группировать точки, мы используем полярную систему координат (рис.4.8) и проекции трехмерного изображения объектов на плоскости OXZ .

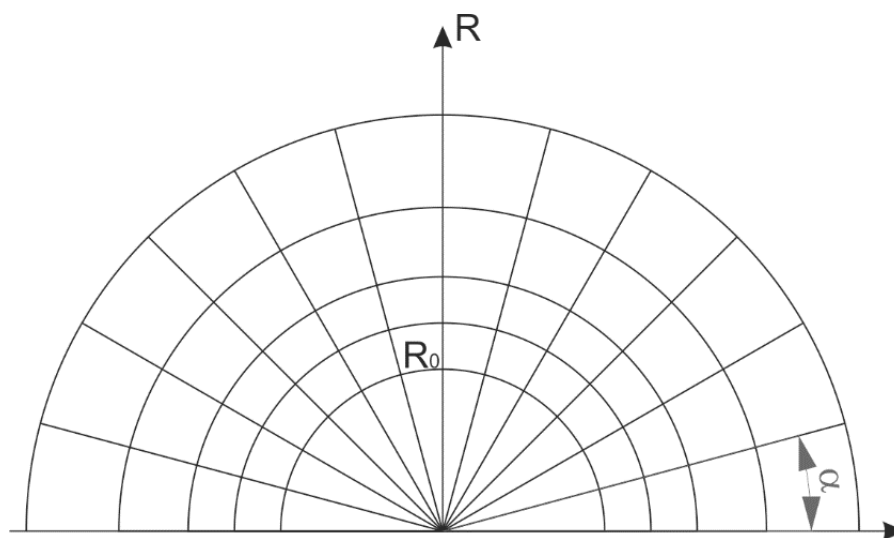


Рис.4.8 Полярная система координат

Для перехода точки $M(x,z)$ с системы координат OXZ на полярную систему координат $M(r,\varphi)$.

В полярной системе координат мы делим пространство с помощью сетки, как это показано в рисунке 4.7. Начало сетки начинается с $R=R_0$, где R_0 – минимальная дистанция до объектов, на которой стереоскопическая

система может функционировать. Расстояние между ячейками сетки по радиусу равно погрешности измерения стереоскопической системы на таком расстоянии. Угол между ячейками равен α и соответствует углу между лазерными линиями. Все ячейки, в которых есть точки объекта, получают статус 1. Остальные ячейки получают статус 0. Алгоритм различения объектов работает следующим образом: если две ячейки имеют одну или больше общих сторон, то они принадлежат одному объекту.

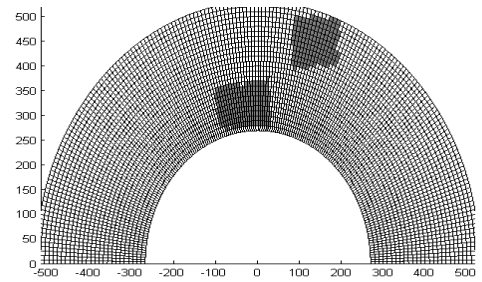
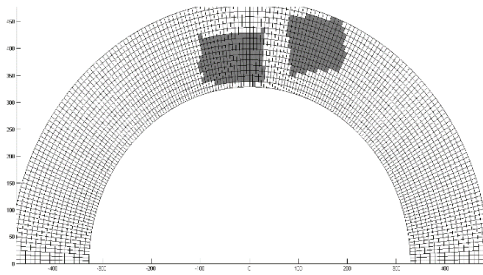
После различения объектов друг от друга можно сравнить объекты в текущем кадре с объектами в предыдущем кадре. Этот процесс можно выполнить разными методами, в том числе существуют методы распознавания объектов по размерам и по направлениям движения [88,89].

После распознавания объекта, можно сравнить их положение в предыдущем кадре с их положением в текущем кадре. В результате можно найти их скорости и направления движения. В итоге, алгоритма различения объектов и определения их скорости и траектории может быть представлен на рисунке 4.9.

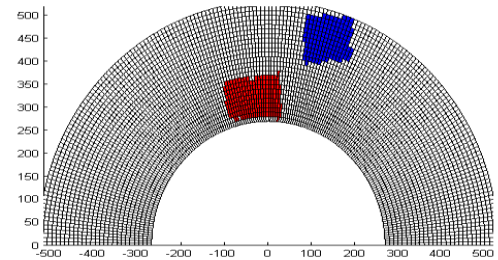
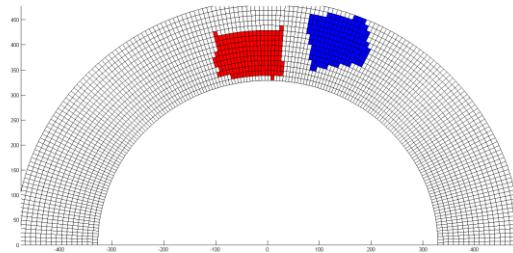


Рис.4.9 Алгоритм различения объектов и определения их скорости и траектории

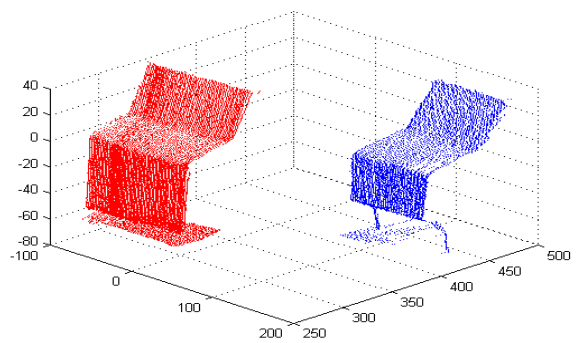
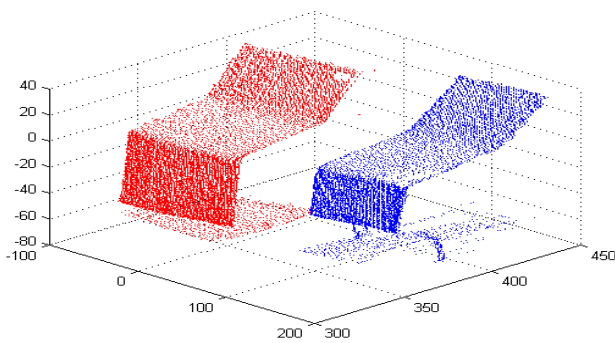
Результат проведенного эксперимента по различению объектов, их распознаванию и определению их скорости и траектории показан на рисунке 4.10.



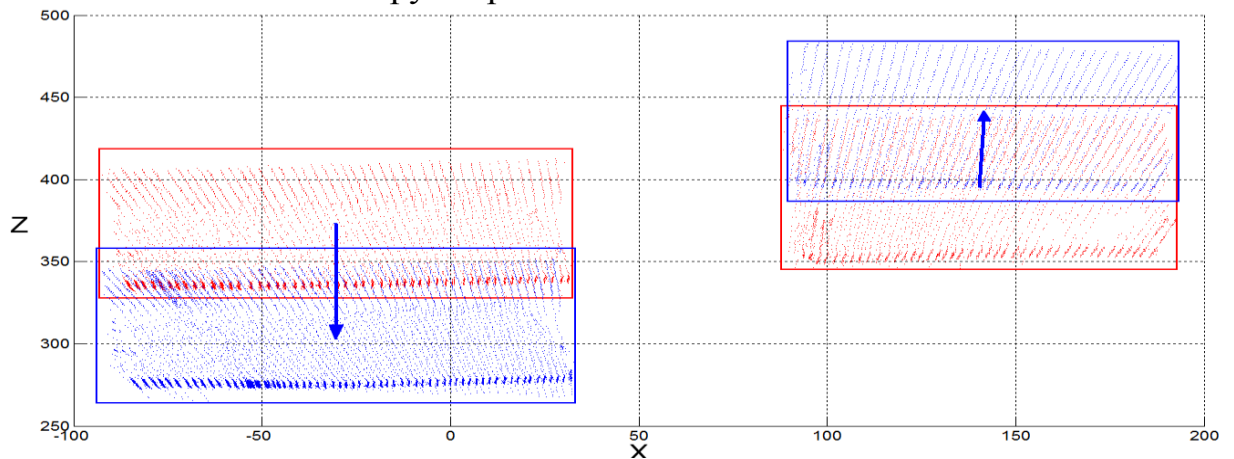
а-переход в полярную систему координат и маркировка ячеек со статусом (серый свет)



б-группировка ячеек по объектам



в-группировка точек по объектам



д-определение скорости и траектории движения объекта (красный – первый кадр, синий – второй кадр)

Рис.4.10 Результаты эксперимента

На рисунке 4.10 показываются процесс и результат различения объектов в двух соседних кадрах. Точки объектов в рисунке 4.10 переведены в полярную систему координат. В полярной системе координат, построена сетка и ячейки сетки, в которых есть точки объектов, маркированы статусом 1 (серый цвет, рис. 4.10 а). Ячейки сетки, в которых нет точек объектов, маркированы статусом 0 (белый цвет, рис. 4.10 а). Используя метод выделения связных областей, группированы ячейки по объектам (синий и красный цвет, рис. 4.10 б). По результатам группировки ячеек по объектам, из облака точек восстановлены трехмерное изображение объектов (синий и красный цвет, рис. 4.10 в). По форме и траектории движения, объекты распознаваны и определены их скорости, траектории движения (рис 4.10 д). По результатам апробации предложенного алгоритма на облаке точек, полученном физической модели АСОЭС показано, что предложенный алгоритм способен для различения объектов друг от друг.

4.5. Выводы по главе 4

В данной главе рассмотрена методика получения трехмерного изображения наблюдаемой сцены.

Предлагается методика получения трехмерных координат объектов в активной стереоскопической системе. С помощью активной стереоскопической системы можно определить координаты сопряженных точек путем определения пересечения изображения лазерной линии с эллиптической линией. Для того, чтобы уменьшить время восстановления трехмерного изображения сцены, в предложенной методике, предварительно вычислены эллиптические линии в процессе калибровки стереоскопической системы и сохранены все возможные варианты эллиптических линий в памяти ЭВМ. Далее, в процессе получения трехмерного изображения сцены, можно просто взять эту информацию из памяти компьютера.

После получения трехмерного изображения сцены в виде облака точек, предлагается алгоритм выделения объектов из сцены. Предлагаемый алгоритм работает на основе определения градиента изменения высоты и сравнения с его пороговым значением.

После получения облака точек, в котором содержится только информация об объектах, предлагается алгоритм различения объектов друг от друга и определения их скорости и траектории движения. Алгоритм различения объектов друг от друга заключается в следующем: производится перевод координат всех пространственных точек объектов в полярную систему координат, затем осуществляется разделение пространства на сетку по углам сканирования лазерных линий и погрешностям измерений стереоскопической системы по расстояниям. После этого производится маркировка всех ячеек сетки, в которых есть точки объектов. Наконец, производится группировка ячеек по объектам согласно следующему правилу: если две ячейки имеют общую границу, то они принадлежат к одному объекту.

Распознавание объектов в соседних кадрах может быть выполнено путем сравнения их размеров или по их траектории движения. На основании результата распознавания объектов в соседних кадрах, можно определить их положения по времени и, следовательно, можно определить их скорости и траектории движения. На основании полученных скорости и траектории движения объектов, активная стереоскопическая система может информировать водителя о возможной опасности либо активировать автоматическую систему предотвращения столкновения.

Заключение

В работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование активной стереоскопической оптико-электронной системы анализа пространства для транспортных средств, использующей цифровые методы обработки информационных сигналов, а также разработка методик получения трехмерного изображения объектов и выделения их из исследуемой сцены.

Результаты работы могут быть сформулированы в следующих выводах.

1. Выполнена классификация различных типов датчиков анализа окружающей среды, которые могут быть применены в активной системе безопасности автомобиля. По результатам анализа характеристик ультразвуковых датчиков, радарных систем, лазерных дальномеров, лазерных триангуляционных датчиков, однокамерных систем, стереоскопических систем, была выбрана стереоскопическая система для разработки активной системы безопасности автомобиля.

2. Проведен анализ существующих методов калибровки камеры и стереоскопической системы в целом, а также видов тест-объектов для калибровки. На основе результата анализа выбран метод калибровки Тсая. Тест-объект «шахматная доска» был доработан путем введения контрастной рамки и разработана методика автоматической калибровки стереоскопической системы с использованием этого тест-объекта. Данная методика реализована в среде Matlab, в которой проведено исследование погрешности определения контрольных точек в автоматическом и ручном режимах, и погрешности калибровки стереоскопической системы в зависимости от количества кадров. Результат исследования показал, что погрешность калибровки стереоскопической системы стабилизируется при использовании не менее 20 кадров.

3. Проведено исследование погрешности измерения стереоскопической системы при фиксированном значении погрешности определения

сопряженных точек в стереопаре. На основании результатов исследования выбран конвергентный вид расположения камер в АСОЭС.

4. Разработана методика расчета габаритных параметров активной стереоскопической системы с целью применения в активной системе безопасности автомобиля. Проведена проверка погрешности измерения стереоскопической системы нормального вида и конвергентного вида при наблюдаемой одной сцены и фиксированной длине стереобазы и фиксированной погрешности определения координат сопряженных точек в стереопаре на компьютерной модели стереоскопической системы.

5. Разработана методика получения трехмерных изображений наблюдаемой сцены в активной стереоскопической системе.

6. Разработан алгоритм выделения объекта из облака точек наблюдаемой сцены.

7. Разработан алгоритм различения объектов друг от друга в облаке точек наблюдаемой сцены.

Список литературы

1. Госавтоинспекция МВД России: Графический анализ. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.gibdd.ru/stat/charts/>, свод. доступ. Дата обращения: 01 сентября 2014г.
2. Саша ПЯТНИЦКАЯ. Сергей Иванов: Аварии на дорогах наносят России ощутимый экономический ущерб. Комсомольская правда. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.kp.ru/online/news/693035/>, свод. доступ. Дата обращения 01 сентября 2014г.
3. Randall O'Tolle. Gridlock! : why we are stuck in traffic and what to do about it // Cato Institute. ISBN 978-1-935308-23-2. 2009. P189-192.
4. Под редакцией Charles E. Thorpe. Vision and Navigation. The Carnegie Mellon Navlab // Springer US. 1990.
5. No Hands Across America Home Page // [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.cs.cmu.edu/~tjochem/nhaa/nhaa_home_page.html, англ. язык. Свободный доступ (Дата обращения: 07 октября, 2014)
6. USAtoday.com. Without driver or map, vans go from Italy to China - USATODAY.com // [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://usatoday30.usatoday.com/tech/science/2010-10-28-driverless-van_N.htm?csp=, англ. язык. Свободный доступ (Дата обращения: 07 октября, 2014г.)
7. Wikipedia. Беспилотный автомобиль Google // [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Беспилотный_автомобиль_Google, русс. язык. Свободный доступ (Дата обращения: 07 октября, 2014г.)

8. Компания КИА. Инструкция по эксплуатации Kia c'eed // [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.plt-kia.ru/upload/download/Ceed/ceed.pdf>, англ. язык. Свободный доступ (Дата обращения: 07 октября, 2014г.).
9. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: Учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004. С. 320.
10. Бартон Д. Радиолокационные системы // Сокращенный перевод с английского под редакцией Трофимова К. Н. — М. — Военное издательство, 1967. — 480 с.
11. Компания FUJISU TEN. 76GHz Millimeter Wave Automobile Radar using // [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.fujitsu-ten.com/business/technicaljournal/pdf/23-2.pdf>, англ. язык. Свободный доступ (Дата обращения: 07 октября, 2014г.).
12. EURONCAP. Mercedes-Benz PRE-SAFE® Brake | Euro NCAP - For safer cars // [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://ru.euroncap.com/ru/rewards/mercedes_benz_pre_safe_brake.aspx, русс. язык. Свободный доступ (Дата обращения: 07 октября, 2014г.).
13. Safety activities technology overview // Nissan's Approach to safety. [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.nissan-global.com/EN/DOCUMENT/PDF/TECHNOLOGY/safety_activities/safety_activities_E.pdf, англ. язык. Свободный доступ (Дата обращения: 07 октября, 2014г.).
14. Erico Guizzo. How Google's Self-Driving Car Works // IEEE SPECTRUM. 18 октября 2011г. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/artificial-intelligence/how-google-self-driving-car-works>, англ. язык. Свободный доступ (Дата

обращения: 07 октября, 2014

15. Байбородин Ю.В. Основы лазерной техники. - 2-ое изд., перераб. и доп. - К.: выща шк. Головное изд-во, 1988.- 383 с.
16. Лазерные приборы и методы измерения дальности : учеб. пособие / В.Б. Бокшанский, Д.А. Бондаренко, М.В. Вязовых, И.В. Животовский, А.А. Сахаров, В.П. Семенов ; под ред. В.Е. Карасика. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.
17. Берников Б.О., Бокшанский В.Б., Вязовых М.В., Перов А.Н. Исследование факторов, влияющих на погрешность измерения расстояния фазовым лазерным дальномером. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 9. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://engjournal.ru/articles/911/html/files/assets/basic-html/page1.html>. Свободный доступ (Дата обращения: 07 октября, 2014г.).
18. Федоров Б.Ф. Лазеры. Основы устройства и применение. - М.: ДОСААФ, 1988.- 190с., ил.
19. Шандыбина Г.Д., Парфенов В.А. Информационные лазерные технологии. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008, 107 с.
20. Г.Д. Шандыбина, В.А. Парфенов. Информационные лазерные технологии. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008, 107 с.
21. Riegl laser measurement systems. RIEGL LMS-Q120ii. // [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.riegl.com/nc/products/industrial-scanning/produktdetail/product/scanner/10/>, англ. язык, свободный доступ (Дата обращения: 08 октября, 2014г.).

22. Velodyne. High Definition Lidar HDL-64E S2 // [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://velodynelidar.com/lidar/products/brochure/HDL-64E_S2_datasheet_2010_lowres.pdf, англ. язык. Свободный доступ (Дата обращения: 08 октября, 2014г.).
23. Velodyne. High Definition Lidar HDL-32E. // [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://velodynelidar.com/lidar/hdlproducts/97-0038d%20HDL-32E_datasheet.pdf, англ. язык. Свободный доступ (Дата обращения: 08 октября 2014г.).
24. SICK Sensor Intelligent. Operating Instructions. LD-LRS1000 to 5100 Laser Measurement System. // [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.mysick.com/saqqara/im0027494.pdf>, англ. язык. Свободный доступ (Дата обращения: 08 октября, 2014г.).
25. SICK. Technical Description. LMS 200 / LMS 211 / LMS 220 / LMS 221 / LMS 291. Laser Measurement Systems. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.sick-automation.ru/images/File/pdf/LMS%20Technical%20Description.pdf>, англ. язык. Свободный доступ (Дата обращения: 08 октября 2014г.).
26. Martin Buehler, Karl Iagnemma, Sanjiv Singh. The DARPA Urban Challenge: Autonomous Vehicles in City Traffic. Springer Science & Business Media, 11 нояб. 2009 г.
27. Климанов М.М. лазерная триангуляционная измерительная система. Материалы XI научной конференции МГТУ «Станкин» и «Учебно-научного центра – ИММ РАН» по математическому моделированию и информатике. 23 – 25 апреля 2008 года.
28. Твердохлеб П.Е., Коронкевич В.П., Косцов Э.Г. и др. 3D лазерные информационные технологии. – Новосибирск: Рос. акад. наук, Сиб.

отделение, Ин-т автоматизации и электротехники, 2003.

29. Дунин-Барковский И.И. Построение системы контроля размеров крупногабаритных деталей на основе 3D-системы технического зрения // Измерительная техника. – 2004. № 12. С. 19.
30. X. Zhu, S. Miller, M. Kwan, I.C. Smith. A High Resolution 3D Laser Camera for 3D Object Digitization // Laser Radar Technology and Applications X, edited by Gary W. Kamerman, Proc. of SPIE Vol. 5791 (SPIE, Bellingham, WA, 2005). P. 120-127.
31. Jerrod P. Peterson and Richard B. Peterson. Laser triangulation for liquid film thickness measurements through multiple interfaces // APPLIED OPTICS / Vol. 45, No. 20 / 10 July 2006. P. 4916-4926.
32. Теория триангуляционного метода измерения. [Электронный ресурс] <http://www.controlplast.ru/site/index.php?rproducts/klaser/teoria-triangulyaciya>, своб. доступ. Дата обращения 01 октября 2013.
33. Наземное лазерное сканирование: монография / В.А. Середович, А.В. Комиссаров, Д.В. Комиссаров, Т.А. Широкова. - Новосибирск: СГГА, 2009. -261с.
34. riftek. Модель РФ603 // [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.riftek.com/media/imagesfromtext/RF60/rf603/rf603_specification_rus_sm.jpg. Свободный доступ (Дата обращения: 08 октября 2014г.).
35. riftek. Модель РФ600 // [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.riftek.com/media/imagesfromtext/RF60/rf600/rf600_specification_rus_sm.jpg. Свободный доступ (Дата обращения: 08 октября 2014г.).
36. riftek. Основные технические данные // [Электронный ресурс] - Режим доступа:

- http://www.riftek.com/media/imagesfromtext/RF60/rf605/rf605_specification_rus_sm.jpg. Свободный доступ (Дата обращения: 08 октября 2014г.).
37. riftek. 2D лазерные триангуляционные датчики, разработка и производство 2D сканеров | РИФТЭК // [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.riftek.com/ru/products/~show/sensors/2D-scanners>. Свободный доступ (Дата обращения: 08 октября 2014г.).
 38. Кашкаров Андрей Петрович. Андрей Кашкаров: Видеокамеры и видеорегистраторы для дома и автомобиля // ДМК-Пресс, 2014г.
 39. Skoda. Skoda Octavia III. Знакомство с автомобилем. Часть II. Программа самообучения. [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://vwts.ru/pps/pps_sk_097_skoda_octavia_III_2_rus.pdf. Свободный доступ (Дата обращения 08 октября 2014г.).
 40. Audi Q7 - Новые вспомогательные системы для водителя. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.audagena.lt/info/docs/375%20Audi%20Q7%20vspomogatelnye%20sistemy.pdf>. Свободный доступ (Дата обращения: 08 октября 2014г.).
 41. A. Davison, "Real-time simultaneous localisation and mapping with a single camera," in Proc. International Conference on Computer Vision Nice, France, Oct. 2003, pp. 1403–1410.
 42. T. Schon and F. Gustafsson, "Integrated navigation of cameras for augmented reality," in Proceedings of the 16th IFAC world Congress, Prague, Czech Republic, Jul. 2005, to appear
 43. R. Hartley and A. Zisserman, Multiple view Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2000.

44. Jeroen Hol, Per Slycke, Thomas Schön, Fredrik Gustafsson. 2d-3d model correspondence for camera pose estimation using sensor fusion. InerVis workshop at the IEEE International Conference on Robotics and Automation 2005. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://users.isy.liu.se/en/rt>.
45. William Lovegrove; Ben Brame. Single-camera stereo vision for obstacle detection in mobile robots. Proc. SPIE 6764, Intelligent Robots and Computer Vision XXV: Algorithms, Techniques, and Active Vision, 67640T (10 September 2007); doi: 10.1117/12.732651.
46. DooHyun Lee, Inso Kweon. A novel stereo camera system by a biprism // Robotics and Automation, IEEE Transactions on (Volume:16 , Issue: 5). 06 August 2002. P.528 - 541.
47. W. Lovegrove and B. Brame, Single-camera stereo vision for obstacle detection in mobile robots, Proc. SPIE 6764, p. 67640T, 2007. doi:10.1117/12.732651.
48. D.H. Lee, I.S. Kweon, A New Stereo Camera System by a Biprism, 10th Workshop on Image Processing and Understanding, JeJu, Korea, , pp. 291-296, 1998.
49. A. Goshtasby and W. A. Gruver, Design of a Single-Lens Stereo Camera Sstem, Pattern Recognition, vol. 26, pp. 923-936, 1993.
50. И.С. Грузман В.С.К.и.д. Цифровая обработка изображений в информационных системах, учеб. Пособие. Новосибирск: НГТУ, 2002.
51. Пономарев С.В., методика сравнения алгоритмов стереозрения при восстановлении трехмерной модели лица человека // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. Vol. 88. P40.

52. Salvador Gutierrez, Jose Luis Marroquin, Robust approach for disparity estimation in stereo vision // Image and Vision Computing. 2004. Vol. 22. P183.
53. Michael Bleyer, Margrit Gelautz, A layered stereo matching algorithm using image segmentation and global visibility constraints // ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. 2005. Vol. 59. P128.
54. Hansung Kim, Kwanghoon Sohn, 3D reconstruction from stereo images for interactions between real and virtual objects // Signal Processing: Image Communication. 2005. Vol.20. P61.
55. Luigi Di Stefano, Massimiliano Marchionni, Stefano Mattocia, A fast area-based stereo matching algorithm // Image and Vision Computing. 2004. Vol. 22. P983.
56. Elisabetta Binaghi, Ignazio Gallo, Giuseppe Marino, Mario Raspanti, Neural adaptive stereo matching // Pattern Recognition Letters. 2004. Vol. 25. P1743.
57. Abhijit S. Ogale, Yiannis Aloimonos, Shape and the Stereo Correspondence Problem // IJCV. 2005. Vol. 65. P147.
58. Sukjune Yoon, Sung-Kee Park, Sungchul Kang, Yoon keun Kwak, Fast correlation-based stereo matching with the reduction of systematic errors // Pattern Recognition Letters. 2005. Vol. 26. P2221.
59. Sarna, C.C., Theuer, C. and Henriksen, S.W., Manual of Photogrammetry. 1980. 4th edn. American Society of Photogrammetry: Falls Church, VA.
60. Joaquim SALVI MAS. An approach to coded structured light to obtain three dimensional information // PhD. Thesis. University of Girona. Department of Electronics, Informatics and Automation. ISBN: 84-8458-107-1.

61. Н.П. Деменков, М.Ю. Артюхов. Калибровки видеокамер с помощью нейронных сетей и генетических алгоритмов. Труды IX Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO 12 Москва 30 Января – 2 Февраля 2012.
62. R.Y. Tsai, A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the shelf TV cameras and lenses, IEEE Int. J. Robot. Automat. RA-3 (1987) 323–344.
63. David A. Forsyth and Jean Ponce (2003) Computer Vision, A Modern Approach. Prentice Hall. ISBN 0-12-379777-2.
64. Волосов Д. С. Фотографическая оптика: (Теория, основы проектирования, оптич. характеристики). Учеб-пособие для киновузозы. - 2-е изд. - М.: Искусство, 1971. 543 с.
65. Фаддеев Д.К., Фаддеева В.Н. Вычислительные методы линейной алгебры. Учебники для вузов. Специальная литература // изд. Лань. 2002. ISBN 5-8114-0317-8; 1/1/2002 г.
66. Нгуен Хоанг Вьет, А.В. Краснящих. Калибровка стереоскопической системы. Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых, Выпуск 2. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. –с.122.
67. Коротаев В. В., Краснящих А. В., Ярышев С. Н., Нгуен Х. В. Метод автоматической калибровки стереоскопической системы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. №4(92). Июль–август 2014г. - С. 29-34.
68. Bouguet Jean-Yves. Camera Calibration Toolbox for Matlab // vision.caltech.edu: Computational Vision. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/, свободный. –

Яз. англ. (дата обращения: 13.05.2014)

69. He LF, Chao YY, Suzuki K. An algorithm for connected-component labeling, hole labeling and Euler number computing. Journal of computer science and technology 28(3): 468–478 May 2013. DOI 10.1007/s11390-013-1348-y
70. Крылов Д.В. Исследование метода фотограмметрической калибровки цифровых камер с использованием пространственного тест-объекта // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2011. № 1. С. 57–62.
71. Х.В. Нгуен, В.В. Коротаев. Активная стереоскопическая система. Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых, Выпуск 2. – СПб: Университет ИТМО, 2014. – с.109.
72. Коротаев В.В., Ярышев С.Н., Нгуен Хоанг Вьет. Активная оптико-электронная система безопасности автомобиля. Труды 11 Международной конференции «Прикладная оптика-2014». Под редакцией Л.Н. Архиповой,
73. Грязин Г.Н. Системы прикладного телевидения // СПб.: Политехника, 2000. - 277 с.
74. Бруевич П.Н. Фотограмметрия: Учеб. для вузов. - М.: Недоа, 1990. - 250 с.: ил.
75. Назаров, А.С. Фотограмметрия : учеб. пособие для студентов вузовы / А.С. Назаров. - Мн.: ТетраСистемс, 2006. - 368 с. : ил.
76. Нгуен Хоанг Вьет, В.В. Коротаев, А.В. Краснящих. Исследование влияющих факторов при построении 3D-моделей. Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых, Выпуск 2. – СПб: НИУ ИТМО,

2013. – с.70.

77. Х.В. Нгуен. Изучение погрешности измерения стереоскопической системы в зависимости от угла визирования, величины стереобазы и расстояния от объекта до камер. Научно-технический интернет-журнал "ТелеФото Техника" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.telephototech.ru/kat_podr.php?stid=29&st_gr_id=5.
78. Скорость автомобиля и безопасность. Часть 1 // [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://transspot.ru/2013/02/24/skorost-avtomobilya-i-bezopasnost-chast-1/>. Свободный доступ (Дата обращения 08 октября 2014г.).
79. В.И. Анохин. Советские автомобили Справочник. Изд. Машгиз, 1947. С.720.
80. Graham Rowan. fps1000 - The low cost high frame rate camera. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.kickstarter.com/projects/1623255426/fps1000-the-low-cost-high-frame-rate-camera>. Агл. язык. Свободный доступ. Дата обращения 20 октября 2014г.
81. Коротаев В.В., Нгуен Х.В., Ярышев С.Н. Исследование погрешности измерения оптико-электронных датчиков на основе стереоскопической системы конвергентного и нормального видов. Сборник трудов II Международной научно-практической конференции «Sensorica – 2014», – СПб: НИУ ИТМО, 2014. С.152-154.
82. Е.В. Волков, С.В. Плотников. Исследование влияния ширины зондирующего пучка на погрешность измерения триангуляционных систем. Российская академия наук, Сибирское отделение. Автометрия.

- №2, 1997. Трехмерная оптика. С. 19-25.
83. Андреев А.Л. Автоматизированные видеоинформационные системы – СПб: НИУ ИТМО, 2011. – 120 с.
84. Н. Е. Пилипко, А. Е. Рычажников. Особенности работы кмп-фотоприемника в режиме бегущего электронного затвора. Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". № Января 2008. С.40-54.
85. Кафедра Прикладной и компьютерной оптики, университет ИТМО. Фильтрация Винера. Электронный ресурс. [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://aco.ifmo.ru/el_books/image_processing/8_02.html, свободный доступ.
86. В.В. Коротаяев, Т.С. Джамийков, Х.В. Нгуен, С.Н. Ярышев. Метод определения пространственных координат в активной стереоскопической. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики -2014. - № 6(94). С.48-53.
87. Коротаяев В.В., Нгуен Х.В., Тимофеев А.Н., Ярышев С.Н. Метод выделения препятствия для активной системы безопасности автомобиля на основе стереоскопической системы // Известия вузов. Приборостроение. - Санкт-Петербург, 2014. — Т. 57, № 12.
88. Serge Belongie, Jitendra Malik, Jan Puzicha. Shape matching and object recognition using shaping contexts. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol.24, no.24, april 2002. PP.509-522.
89. Adnam Khashman. Automatic detection, extraction and recognition of moving objects. International journal of systems applications, engineering and development. Issue 1, Volume 2, 2008. PP.43-51.