**Министерство образования и науки Российской Федерации**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**

**высшего профессионального образования**

**«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»**

**(МГТУ им. Н.Э.Баумана)**

ФАКУЛЬТЕТ \_\_\_ Робототехника и комплексная автоматизация \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

КАФЕДРА \_\_\_\_ Компьютерные системы автоматизации производства \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

***К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ***

***НА ТЕМУ:***

***“*Разработка автоматизированной хирургической**

***навигационной системы***

Студент \_\_\_\_\_РК9-81\_\_\_\_\_ **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_В. С. Рамжаев\_\_\_\_\_**

(Группа) (Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Руководитель ВКР \_**\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_С. С. Гаврюшин\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Консультант  **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_С. С. Хрыков\_\_\_\_\_\_** (Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Нормоконтролер **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_М.Н.Святкина\_\_\_\_\_**

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

*2016г.*

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

[**Введение** 3](#_Toc453263812)

[**1.** **Пред проектное исследование** 5](#_Toc453263813)

[**2.** **Техническое задание** 11](#_Toc453263814)

[**2.1.** **Общие сведения** 11](#_Toc453263815)

[**2.2.** **Назначение и цели создания системы** 11](#_Toc453263816)

[**2.2.1.** **Назначение и область применения** 11](#_Toc453263817)

[**2.2.2.** **Цель и задачи** 11](#_Toc453263818)

[**2.3.** **Характеристика объектов** 12](#_Toc453263819)

[**2.4.** **Требования к системе** 12](#_Toc453263820)

[**2.4.1.** **Требования к надежности** 12](#_Toc453263821)

[**2.4.2.** **Требования к функциональным характеристикам** 12](#_Toc453263822)

[**2.4.3.** **Технологические требования** 13](#_Toc453263823)

[**2.4.4.** **Требования по техническому обслуживанию** 13](#_Toc453263824)

[**2.4.5.** **Требования к программной документации** 14](#_Toc453263825)

[**2.4.6.** **Требования к климатическим условиям эксплуатации** 14](#_Toc453263826)

[**3.** **Концептуальный этап проектирования** 15](#_Toc453263827)

[**3.1.** **Стереозрение** 15](#_Toc453263828)

[**3.2.** **Математическая модель камеры** 17](#_Toc453263829)

[**3.3.** **Стерео калибровка** 18](#_Toc453263830)

[**3.4.** **Исправление стереоизображений** 20](#_Toc453263831)

[**3.5.** **Стереосоответствие** 25](#_Toc453263832)

[**3.7.** **Детектирование сферических маркеров** 28](#_Toc453263833)

[**4.** **Рабочее проектирование системы** 32](#_Toc453263834)

[**4.1.** **Библиотека OpenCV** 32](#_Toc453263835)

[**4.2.** **Обзор инструментов системы стереозрения** 32](#_Toc453263836)

[**4.3.** **Инструменты системы стереозрения** 34](#_Toc453263837)

[**4.4.** **Выбор камер** 41](#_Toc453263838)

[**Заключение** 45](#_Toc453263839)

[**Список литературы:** 46](#_Toc453263840)

**ВВЕДЕНИЕ**

В современном мире с развитием технологий стало развиваться направление компьютерного зрения. Сейчас данная область охватывает огромное количество сфер, начиная от систем видеонаблюдения до промышленных роботизированных комплексов и автономных транспортных средств. Для компьютерных систем, доступ к изображениям окружающей среды, полученных при помощи цифровых камер, представляет ключевую роль в детектирование объектов, их распознавании, определении человека, помогает пользователю в принятии решений. Глубина играет важную роль в определении среды вокруг системы, так как она может определить расстояние от системы до объектов в ее окрестностях. Поэтому, очень важно иметь средства для получения этих данных без знания заранее, и одним из таких способов является вычисление расстояния автоматически при помощи стереосистемы.

В этой работе описывает процесс построения пользовательского стереозрения для стереопроцессов реального времени, от выбора камер до перепроектирования 3-D облака точек. Целью данной работы является разработка и анализ автоматизированной хирургической навигационной системы с использованием машинного зрения. Эта расчетно-пояснительная записка содержит четыре главы, описывающие проделанную работу. В первой главе рассматриваются типы хирургических навигационных систем, их основные применения, делается анализ аналогов системы и сравнение их характеристик. Во второй главе формулируется техническое задание на разработку программно-аппаратного комплекса, приводятся основные сведения и требования к системе. В третьей части описываются теоретические аспекты, которые использовались при написании программного обеспечения. Четвертая глава описывает основные инструменты работы для программирования, а также функции, которые были использованы при написании кода программы. Кроме того, в этой части описывается процесс выбора камер для стереосистемы. В заключении представлен результат проделанной работы, а также список используемой литературы.

1. **Предпроектное исследование**

В современном мире системы для малоинвазивной хирургии являются актуальными средствами для проведения сложнейших операций на различных органах и тканях. Использование хирургических навигационных систем снижает риск возникновения постоперационных осложнений и уменьшает время проведения хирургического вмешательства. Данная система позволяет отслеживать положение инструмента в реальном времени, тем самым помогая хирургу контролировать инструмент и проводить операции с нанесением меньшего вреда пациенту. В свою очередь, не каждая клиника в нашей стране может позволить себе такую систему, поэтому разработка данных систем является одной из важнейших задач в области медицинской автоматизации. Основной задачей данной дипломной работы является разработка отечественной оптической хирургической навигационной системы для внедрения в клинико-диагностических центрах, больницах и других учреждениях здравоохранения при проведении сложных хирургических и диагностических вмешательств, в том числе малоинвазивных.

Системы хирургической навигации могут быть реализованы с использованием оптического излучения, электромагнитного излучения, акустического излучения или на базе гироскопов. На данный момент малое распространение получили системы на базе гироскопов, применение нашлось только в области протезирования суставов, хотя точность у такой навигации выше чем у оптической и электромагнитной в этой области. Одной из фирм, производящих такие навигационные системы, является американская фирма Zimmer. Ее продукт Zimmer iAssist Knee имеет точность: 1.8±1.3 мм, стоимость операции с применением такой системы около 1000$[1]. Недостатком данных систем является то, что присутствует жесткая привязка к положению инструмента, что препятствует изменению позиции пациента во время операции.

Акустические системы навигации не получили большого распространения в связи со сложностью используемой аппаратуры, а также дороговизной ее установки в операционной[2].

Системы навигации использующие электромагнитное излучение имею высокую скорость работы, они регистрируют инструмент с большей точностью, чем акустические или оптические системы, но аппаратура, используемая для регистрации, имеет высокую стоимость, а также требует вспомогательных средств контроля положения инструмента. Чаще всего их используют совместно с оптическими системами.

Наибольшее распространение получили устройства с оптической навигацией. Современные системы используют стереокамеры излучающие инфракрасное излучение, которое может определить положение известных объектов, например: отражающих маркеров. Обобщенная принципиальная схема таких систем представлена на рисунке 1.

**Подсистема калибровки камер**

**Подсистема регистрации положения**

**Подсистема визуализации**

**Хирургическая навигационная система**

**Данные с внешних источников**

Рис. 1. Обобщенная принципиальная схема навигационной системы

Благодаря более дешёвым комплектующим и большей доступности оптические навигационные системы приобрели популярность в медицинской сфере. Развитие технологий компьютерного зрения и вычислительной техники позволило существенно увеличить вычисление положения специализированного хирургического инструмента. Также данные системы позволяют регистрировать любое количество объектов, попадающих в поле зрения камеры, не увеличивая цены системы. К тому же, нет привязки к положению пациента.

Основными характеристиками таких систем является

* Точность, которая ограничивается разрешающей способностью камер
* Частота обновления положения
* Возможность подключения внешних носителей и оборудования

Основной сложностью систем с оптической навигацией, возникающей при разработке, является динамическое изменения яркости фона, что напрямую влияет на детектирование маркеров.

Каждая оптическая навигационная система имеет базовую комплектацию в виде: стереоскопических камер, компьютерной платформы с экраном и соответствующее программное обеспечение для навигации. Большинство таких устройств производится за рубежом. На рисунке 2 представлена диаграмма показывающая процентное соотношение между странами, производящими хирургические навигационные системы.

Рис. 2. Диаграмма процентного соотношения между странами, производящими хирургические навигационные системы

Американские и немецкие аналоги, разрабатываемой системы, такие как: StealthStation S7 (американская компания Medtronic), Navigation System (американская компания Struker) и VectorVision 2 (немецкая компания Brainlab), имеют схожую структуру, показанную на рисунке 3.

Система StealthStation S7 имеет точность 0.7±0.25мм, оснащена: лазерным указателем, для более легкого позиционирования и прицеливания; монитором 15.25” с разрешением 1440х900, 60Гц; электронной системой контроля, для нейронавигации; система бесперебойного питания, которая позволяет отключить систему без потери данных. Применяется в нейрохирургии головного мозга и вертебрологии. Имеет возможность подключения микроскопов; дополнительных мониторов, для отображения, систем томографии (O-Arm, C-Arm) и т.д. Связь со сторонними устройствами осуществляется по протоколу DICOM, передача данных возможна при помощи CD-дисков или Flesh-накопителей[3].



**Блок управления, система бесперебойного питания**

**Монитор с сенсорным управлением**

**Две стерео камеры с лазерным указателем**

Рис. 3. Хирургическая навигационная система.

Система VectorVision 2, компании Brainlab, имеет схожую оснастку с StealthStation S7. Позволяет подключать микроскопы; дополнительные мониторов, для отображения; ноутбуки и станций планирования, системы томографии (O-Arm, C-Arm), систему Airo (разработана для визуализации мягких тканей, что позволяет получать более точные изображения позвоночника[4]). Система поддерживает интерфейсы USB, стандарт DICOM. Точность этой системы 1.8±0.8 мм. Данная система оснащена 1 Гц процессором Digital Technologies, с системой Windows NT 4.0. Система применяется в вертебрологии и протезировании коленного сустава.

Система Navigation System, компании Struker, имеет схожую комплектацию с предыдущими двумя системами. Поддерживает протоколы передачи данных USB и LAN. Не имеет возможности подключения к другим системам детектирования. Имеет точность 0.91±0.28мм. Поддерживает MicroSD, для загрузки данных с других устройств.

Исходя из рассмотренных выше систем, можно сделать вывод, что разрабатываемая хирургическая навигационная система должна иметь сравнимые характеристики при меньшей стоимости оборудования и программного обеспечения. Она должна поддерживать загрузку индивидуальной модели пациента, чтобы учесть персональные особенности. Должна быть предусмотрена возможность интегрирования с другими устройствами.

1. **Техническое задание**
   1. **Общие сведения**

Наименование системы: Автоматизированная хирургическая навигационная система

* 1. **Назначение и цели создания системы**
     1. **Назначение и область применения**

Данная автоматизированная хирургическая навигационная система – программно-аппаратный комплекс, предназначенный для:

* Проведения сложных хирургических операций в области вертебрологии
* Комплексной визуализации при проведении малоинвазивных хирургических операций

Система должна помочь хирургам в области вертебрологии и нейрохирургии, уменьшая время на проведение операции, а также пост операционное выздоровление пациента. Она позволит отслеживать расположение инструмента относительно индивидуальных анатомических особенностей пациента в реальном времени, тем самым облегчая вынесение решения в ходе оперирования. Областью применения данных систем является клинические центры, больницы и другие здравоохранительные центры.

* + 1. **Цель и задачи**

Основной целью проектирования данной системы является:

* Создание отечественной хирургической навигационной системы для использования в клинико-диагностических центрах, больницах и других учреждениях здравоохранения при проведении сложных хирургических и диагностических вмешательств, в том числе малоинвазивных.

В процессе выполнения работы должны быть решены следующие задачи:

* Разработка программного обеспечения для параллельной регистрации видео со стереосистемы
* Определение сферического маркера с точностью 1.0±0.5 мм
* Моделирование и визуализация положения инструмента и его перемещения
  1. **Характеристика объектов**

Объектом разработки является система, состоящая из:

* 2 камер для регистрации изображений
* Программного обеспечения
* Системы для управления и программирования
* Объектов детектирования
  1. **Требования к системе**
     1. **Требования к надежности**

Доступ к автоматизированной системе должен осуществляться в соответствии с должностью, занимаемой пользователем

Должна вестись история действий, совершенных над системой.

В данной автоматизированной системе должен быть предусмотрен резервный источник питания, подключающийся при авариной ситуации (сбой в электросети, выход из строя блока питания) во время оперирования пациента.

Хирургическая навигационная система должна обеспечивать точные измерения в зависимости от области ее применения, поддерживать регулировку данных в течении всего срока службы.

* + 1. **Требования к функциональным характеристикам**

Программное обеспечение, используемое на данной хирургической навигационной системе должно выполнять следующие функции:

* Функция калибровки стереосистемы
* Функция детектирования объектов, в том числе после их замены по истечению срока эксплуатации
* Функция загрузки индивидуальной модели анатомии пациента
* Функция просмотра положения хирургического инструмента относительно оперируемого объекта
* Функция сохранения требуемых хирургических данных, которые в дальнейшем могут быть использованы
* Поддержка справочной системы
* Возможность подключения стороннего оборудования или программных пакетов, при наличии необходимого доступа
  + 1. **Технологические требования**

Ниже представлен перечень требований, предъявляемый к навигационной системе.

Автоматизированная система хирургической навигации должна иметь две камеры с разрешением не ниже 640х480 точек при 30fps, оснащенных ПЗС-матрице с одинаковым размером пикселя, а также с одинаковым фокусным расстоянием. Для вычисления система должна обладать вычислительным блоком, имеющий необходимые характеристики для поддержки необходимого программного обеспечения, а также для выполнения всех вычислительных операций. Устройство должно обладать блоком питания с входным напряжением 220В и током 5А. Для вывода информации и управлением программой во время операции должен быть предусмотрен сенсорный дисплей.

* + 1. **Требования по техническому обслуживанию**

Техническая поддержка программного и аппаратного обеспечения может производится, как удаленно по телефону или электронной почте, так и с выездом обеспечивающего персонала.

* + 1. **Требования к программной документации**

Программная документация состоит из:

1. Техническое задание;
2. Руководство пользователя;
3. Программа и методики испытаний;
   * 1. **Требования к климатическим условиям эксплуатации**

Система предназначена для эксплуатации в комнатном помещении, при температуре от +15º до +35º, с влажностью воздуха не более 50%. Система не предназначена для использования при повышенных температурах или экстремальных условиях.

1. **Концептуальный этап проектирования**
   1. **Стереозрение**

Бинокулярное зрение определяется как зрение из двух глаз, где данные, полученные от каждого, перекрываются на некоторую величину. Перекрытие из двух различных точек используется в биологическом зрении для восприятия глубины. Стереоскопическое зрение - это использование бинокулярного зрения для восприятия трехмерных структур в мире. Бинокулярная несоответствие – это различие в размещении объектов при взгляде двумя глазами из различных точек зрения. Система стереозрения представляет собой набор из двух или более камер, используемых машинами для извлечения глубины из 3-D сцены, при взгляде из разных точек, как смоделированное бинокулярное зрение человека. Рисунок 4 демонстрирует, как стереозрение, представленное в организме человека, позволяет извлекать глубину за счет просмотра сцены с разных точек зрения. У людей это известно, как восприятие глубины.



Рис. 4. Пример бинокулярного зрения у людей

В системе стереозрения, камеры выровнены по горизонтали и разделены расстоянием, известным в качестве базовой линии. Используя одну камеру слева и одну камеру справа получаем два изображения, необходимые для извлечения карты глубины, которая предоставляет необходимые данные для 3-D реконструкции.

Измерение расстояния проиллюстрировано с простым расположением, которое показано на рисунке 5. В этой идеальной системе, оптические оси двух камер совершенно параллельны, обе плоскости изображений компланарны и на них не присутствует искажение объектива. На этом изображении, расстояние до точки P в сцене должно быть определено для предоставления ее трехмерных координат. В этом случае, расстояние Z (часто называется глубиной) может быть найдено используя следующее уравнение:

(1)

В этом уравнении, f-фокусное расстояние, B-базовая линия и d- несоответствие, которое определяется, как *d* = *xl*– *xr*.

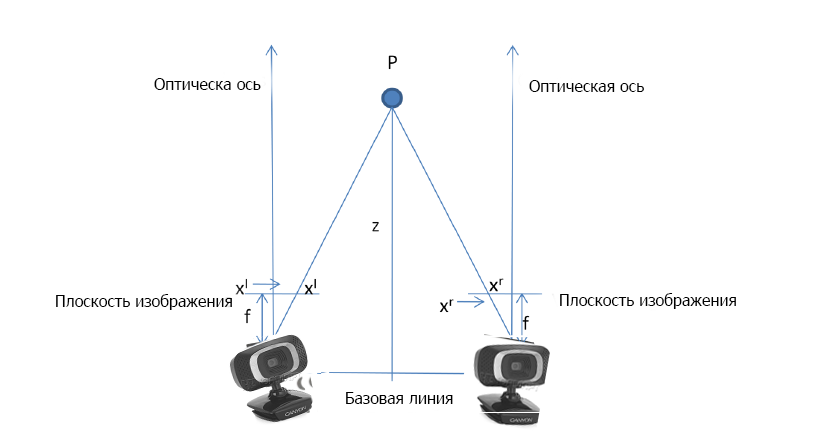


Рис. 5. Геометрия для измерения расстояния.

* 1. **Математическая модель камеры**

Современные камеры, использующие матрицу на базе приборов с зарядовой связью, можно описать используя модель камеры обскура. В такой модели точка трехмерного мира может быть спроецирована на плоскость изображения при помощи перспективной проекции.

Перспективная проекция может быть представлена, как *,* где Q- точки трехмерной сцены с учетом координат центра камеры, q –результирующие точки двумерного изображения, а M называется матрицей камеры. Матрица M 3x3 содержит внутренние параметры для камеры:

Параметры cx и cy представляют центр изображения, который определяется оптической осью линзы и обычно отличается от центра массива ПЗС-матрицы. В идеале, оптические оси должны пересекаться точно в центре датчика, но на практике сенсор смещен на несколько пикселей. Параметры fx и fy представляют горизонтальные и вертикальные масштабные коэффициенты, соответственно. Два параметра требуются, потому, что большинство сенсоров имеют прямоугольные (не квадратные) пиксели. Эти два параметра объединяют фокусное расстояние объектива, f, с физическим размером отдельных элементов на массиве сенсоров: fx=f\*sx и fy=f\*sy, которые являются фактически физическим фокусным расстоянием, умноженным на размер каждого элемента на датчике в пикселях (пиксель на мм).

При использование стандартных стеклянных линз, в отличие от точечной диафрагмы объектива, линии, который являются прямыми в 3-D мире, будут иногда изогнутыми на изображении. Этот эффект более выражен около границ изображения. Это называется цилиндрическое искажение или искажение подушечки, или более общее – радиальное искажение. Изображение 6 – фактическое изображение содержащее радиальное искажение вместе с исправленным изображением.

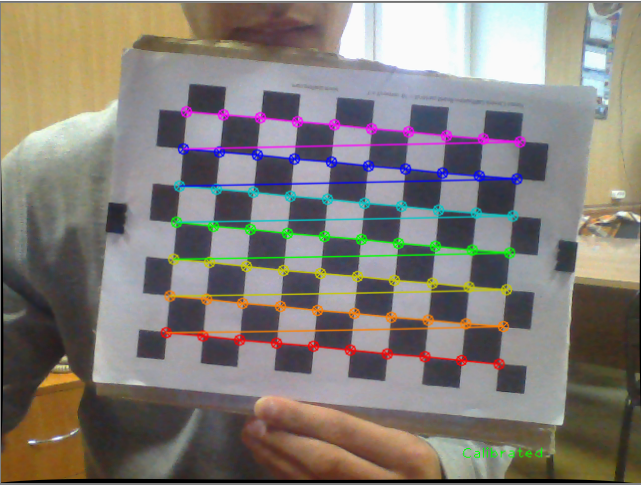
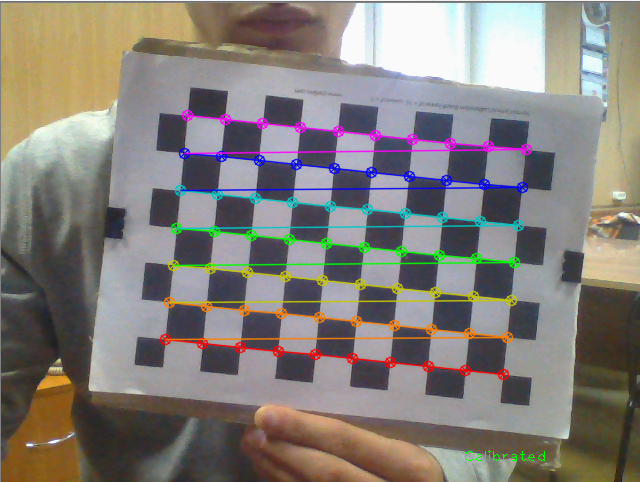


Рис. 6. Калибровочный объект с радиальным искажением (слева) и после коррекции (справа)

Исправленное изображение на рисунке 6 было получено «скручиванием» или «растяжкой» оригинального изображения в соответствии со следующими формулами:

Здесь, (x, y) – позиция пикселя в оригинальном изображении, (xcorrected,ycorrected) – новое положение пикселя в исправленном изображении. Переменная r представляет расстояние от центра изображения. Константа ki получена из разложения в ряд Тейлора около переменной r=0, где коэффициентам мощности требуется сохранять симметричную функцию. Одной целью калибровки камеры является решить уравнения для значений ki.

* 1. **Стерео калибровка**

Для того чтобы применить методы вычисления расстояния с достаточной степенью точности, очень важно откалибровать систему камер. Стерео калибровка – это процесс при котором, при помощи снятых изображений, получают внутренние и внешние характеристики камер. Этот этап является необходимым шагом в задачах, связанных с фотограмметрией, вычислением расстояний и т.п. В дальнейшем полученные характеристики используются для того, чтобы исправить оптически искаженные изображения.

Существуют несколько видов калибровки камер.

1. Алгоритм Роджера Цая. В этом методе вычисления производятся в несколько этапов, начиная с оценки методом наименьших квадратов некоторых параметров и заканчивая многократной нелинейной оптимизацией всех параметров одновременно.
2. Автокалибровка, в которой весь процесс происходит без специальных калибровочных объектов.
3. Метод Zhengyou Zhang, который использовал методы традиционной калибровки (когда известны точки для калибровки) и методы самокалибровки (поиск соответствия между точками калибровки, когда они находятся в разных положениях)

В своей работе я использовал метод Heikkila Silven, который описан в [1]. Этот метод был реализован в библиотеке OpenCV, разработанной на языке программирования C. Метод калибровки предполагает использование образца шахматной доски, которая показана на рисунке 7. Камеры расположены так, чтобы образец появлялся на обоих изображениях. Система автоматически детектирует углы, после того, как задано вручную количество углов по вертикали и горизонтали, в пределах шахматной доски на обоих изображениях. Несколько представлений одной и той же шахматной доски захватываются либо при перемещении камер, либо при перемещении доски. Для достижения высокоточных результатов, рекомендуется использовать, по крайней мере, десять изображений шахматной доски 7 на 8 или больше[1]. Кроме того, необходимо перемещать изображение шахматной доски или камер для получения калибровочного объекта под разными углами.



Рис. 7. Шахматная доска, используемая для калибровки стереосистемы.

Используя полученные координаты от перемещения шахматной доски, процедура калибровки находит вектора вращения и перемещения, которые связаны с левой и правой камерой, а также внутренние параметры камеры.

* 1. **Исправление стереоизображений**

Исправление пары стереоизображений – это процесс трансформации двух изображений так, что соответствующие точки лежат на одних и тех же строках изображения. Более строго, трансформация использует эпиполярные линии, чтобы сделать изображения коллинеарными. Исправление обычно осуществляется с целью ускорения поиска стереосоответствия.

Ниже представлена геометрия стереоизображения на рисунке 8. pL и pR – это проекция точки P на два изображения. Две точки проекции OL и OR вместе с P определяют эпиполярную плоскость. Эпиполярная плоскость пересекает каждую плоскость изображения, чтобы сформировать две эпиполярные линии. Эпиполяр (отмеченный как eL иeR) – это точки на плоскостях изображения, в которых пересекается прямая OLOR, которая соединяет два центра камер. Все эпиполярные линии на изображении должны проходить через эпиполяр изображения. На рисунке 8, две эпиполярные линии могут быть представлены как XLeL и XReR.

Значения эпиполярной геометрии – это точки изображения, назовем XL на левом изображении (рисунок 9), которые определяют эпиполярную линию (показанную красным) на противоположном изображении, которое должно содержать соответствующую точку, если она присутствует. Это «эпиполярное ограничение» важно для сокращения времени вычисления соответствий потому, что оно эффективно снижает поиск в отличие от поиска двухмерных областей изображения. Это ограничение также уменьшает количество неправильных сопоставлений.

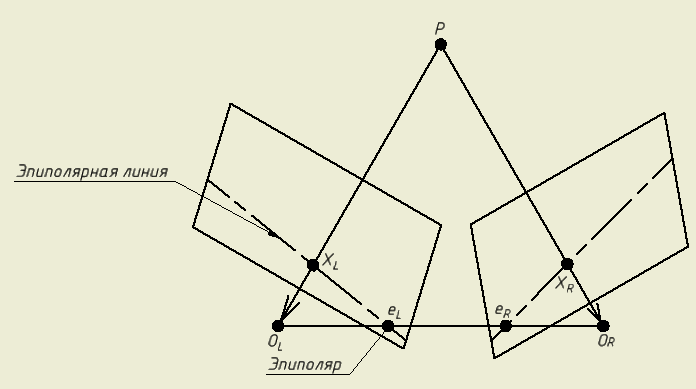


Рис. 8. Эпиполярная плоскость, которая образована трехмерной точкой P и центрами проекций

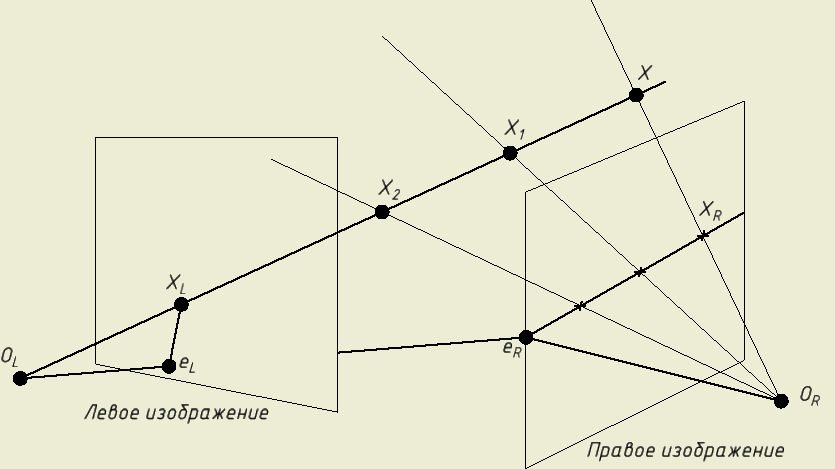


Рис. 9. Эпиполярная плоскость с несколькими трехмерными точками вдоль правой эпиполярной линии, соответствующей левой эпиполярной линии

Рисунок 9 также показывает, что несколько точек в трехмерном пространстве могут быть сопоставлены, как единая точка на левом изображении и, как множество точек вдоль эпиполярной линии на правом. Учитывая точку XL в левом изображении, невозможно определить, какая из точек X2, X1 или X существующая, так как глубина точки не может быть определена при помощи одной камеры.

Чтобы определить эпиполярные линии, должны быть определены две матрицы, существенная матрица и фундаментальная матрица. Разница в том, что существенная матрица, E, связывает правую и левую камеры в трехмерном физическом пространстве (переменные pl и pr), в то время как фундаментальная матрица, F, связывает два одинаковых вида камеры, но в координатах пикселей (переменные ql и qr). Существенная матрица содержит информацию вращения и перемещения от левой камеры до правой камеры в физических координатах. Фундаментальная матрица содержит два параметра описывающих левую и правую эпиполяру.

Принимая точку P, которая отображается как PL в левой камере и PR в правой, отношение PL к PR может быть получено используя векторы вращения и перемещения. Это соотношение выглядит следующим образом:

(2)

Для определения уравнения эпиполярной плоскости воспользуемся уравнением определения по точке A, принадлежащей этой плоскости, и нормали N:

(3)

Так как векторы PL и T (вектор соединяющий центр проекций) содержаться в эпиполярной плоскости, то нормаль этих векторов может быть использована, как вектор N. Взяв векторное произведение, получим вектор нормали для эпиполярной плоскости. Тогда в это уравнение могут быть подставлены все возможные точки P­L, через точку T, где OLOR пересекает эпиполярную плоскость. Чтобы избавиться от точки, воспользуемся тождеством A\*B=AT\*B, чтобы выполнить перемножение, получим:

(4)

Поскольку требуется найти фундаментальную матрицу для выполнения исправлений, должны быть найдены соотношения для ql и qr. Это может быть достигнуто при помощи связи физических координат PL и PR в формуле (2). PR может быть представлено следующим образом:

(5)

Подставив в уравнение (4) получим:

*(6)*

Финальная подстановка была сделана для осуществления произведения вектора T{Tx,Ty,Tz} и вектора PL, где T переписана в виде матрицы S, использующая следующее соотношение:

(7)

Которое определяет S как:

Таким образом, используя матрицу S, получаем:

(8)

Исходя из формулы 6, произведение RS дает нам существенную матрицу E, которая обеспечивает следующее:

(9)

Поскольку здесь в центре внимания находится отношение для ql и qr, то должно быть найдено отношение точек на изображениях pl и pr. Они могут быть заменены при помощи уравнения проекции; которое обеспечивает уравнение проекции:

(10)

Так как существенная матрица не содержит информации о внутренних параметрах камеры, то возможно использовать формулу 8 для соотнесения точек, наблюдаемых левой и правой камерой в реальных координатах. Для выполнения исправления изображений требуется фундаментальная матрица F.

Воспользуемся соотношением для проецирования точек в физическом мире в координаты камеры:

(11)

, где q – физические координаты, M – матрица камеры и Q – координаты камеры, соотношение физических точек в каждом изображении может быть легко преобразовано в соотношение в координатах камеры. Принимая, что, то следует . Подставим в формулу 10, получим:

(12)

Определим фундаментальную матрицу как:

(13)

Тогда соотношение 12 для точки P в координатах камеры даст нам:

(14)

Учитывая две камеры, где внутренние параметры известны, изображения не искажены и плоскости изображения исправлены, камеры могут быть откалиброваны так, что вращение и перемещение одной камеры известно относительно другой. Эти соотношения находятся в матрице вращения и векторе перемещения. Матрица вращения содержит параметры, которые вращают левую камеру так, что ее плоскость изображения математически копланарна с правой камерой. Вектор перемещения связывает позиционирование или смещение, левой камеры с с отношением правой камеры.

Используя формулу (2) и формулу (5) для правой и левой камеры, получаем следующие соотношения для вращения и перемещения:

(15)

(16)

* 1. **Стереосоответствие**

Во время стереосоответствия, неискаженные и выпрямленные изображения из левой и правой камеры используют сопоставления одного изображения с другим. Чтобы определить расстояние от камеры, должно быть найдено несоответствие, изменение расположения точек в левом изображении относительно правого. Из этого следует, что должно быть перекрытие на двух изображениях, так чтобы точка на левом изображении, также существовала на правом изображении, и можно было найти соответствие.

Алгоритм, который был использован мной для вычисления корреляции и поиска несоответствия – это метод сопоставления блоков, где окна суммы абсолютных расстояний (SAD) используются для нахождения соответствий. Окна SAD используются, как метод измерения соответствия для каждого пикселя на изображение на основе окружающих его соседей. Есть три шага для метода сопоставления блоков, которые использует OpenCV; пред-фильтрация, поиск соответствий и пост-фильтрация.

Во время этого этапа, левые и правые изображения нормализуются, так что они имеют одинаковые уровни освещенности. Окно переменного размера помещается на каждый пиксель, и пиксель заменяется с помощью следующих действий:

(17)

В этом уравнении, – это среднее значение интенсивности в окне и Icap – это верхний предел, который устанавливается заранее. Ic – это интенсивность пикселя по которому центрируется окно, он один, который будет меняться.

После устранения искажений, строки на изображениях выравниваются таким образом, чтобы соответствующие точки лежали на одной и той же горизонтальной прямой в обоих изображениях. Окна SAD устанавливаются на пиксель в левом изображении и рассчитывается оценка. Затем алгоритм ищет на правом изображение, начиная с той же координаты, что и на левом изображении, и движется влево, вдоль оси X, вычисляя оценку для каждого положения пикселя до тех пор, пока она достигает максимального неравенства. Неравенство – это количество пикселей смещения от исходного пикселя до пикселя, на котором алгоритм сопоставления закончил работать. Это значение SAD вычисляется, используя следующее уравнение:

(18)

В этом уравнении, (r,c) – это координаты точки, которые ищутся для сопоставления в правом изображении, d – это несоответствие точки на правом изображении от оригинальной точки и w – размер окна, которое помещается вокруг каждой точкой. Это уравнение показывает, что оценки вычисляются, основываясь на значение интенсивности соседних пикселей, окружающих точку. Точка на правом изображении, с минимальным значением внутри области поиска, лучшим сопоставлением для точки на левом изображении. Смещение этой точки от оригинальной в левом изображении применяется в виде неравенства для соответствия и из приведенное выше выражения используется для вычисления глубины. Точки с большим значением несоответствия представляют точки, которые ближе к камере, а маленькое несоответствие показывает, что они находятся дальше от камеры.

Пост фильтрация выполняется для удаления соответствия, которое содержит ложные соответствия. Для этого, OpenCV использует уникальность соотношений, а также порог текстуры. Уникальность соотношений используется, чтобы удостовериться, что значение, которое было вычислено для сопоставленной точки, не является самой близкой отметкой, но является посторонним значением, где она окружена десятками, которые далеки от сопоставления. Порог текстуры устанавливается таким образом, что шум может быть уменьшен во время процесса согласования, без оценки, которая считается ниже порогового значения.

Результат метода совпадений – это изображение где, каждый пиксель является неравенством, которое было найдено из левого и правого изображения, это изображение называется картой неравенства. Примером карты неравенства из оригинального изображения показано на Рисунке 13. Яркие значения интенсивности показывают объекты, которые находятся ближе к камере, более темные объекты – это те, которые находятся дальше от камеры. Черные пиксели – это те точки, где никакого соответствия не было найдено между изображениями.

* 1. **3-D Перепроектирование**

Перепроектирование двумерных точек из набора изображений в трехмерные точки выполняется, используя значения разности каждого пикселя. Каждый пиксель имеет соответствующие (X, Y, Z) координаты, которые характеризуют его позицию в трехмерном пространстве. Z координата находится используя уравнение, связывающее расстояние в зависимости от базового уровня, фокусного расстояния и несоответствия, которое показано ниже:

(19)

В этой формуле, значение несоответствия находится при помощи перемножения корреляционной процедуры на текущий размер отдельного элемента на датчике изображения, получаемый, обеспечивая неравенство, как показатель расстояния. Значения X и Y находятся при помощи поиска размера пикселя из их расчетного состояния, найденного для Z. Во-первых, Поле зрение (FOV) должно быть известно или вычислено используя следующее уравнение:

(20)

Размер значения сенсора – это общий размер по вертикали для вычисления вертикальных FOV и горизонтальный размер для горизонтальных FOV. После того, как вычисляется FOV, размер пикселя может быть найден на заданном расстоянии, используя следующее уравнение:

(21)

Используя горизонтальные и вертикальные FOV будут давать горизонтальное и вертикальное расстояние, охваченное изображением. Исходя из этого измерения и деления его на общее числи горизонтальных или вертикальных пикселей, обеспечивается значение расстояния, пройденного в пиксель на расстоянии Z от камеры. В итоге, используя координаты центра из левой камеры, cx и cy - эти X и Y координаты реального мира могут быть определены координаты пикселей x и y, используя (cx, cy) как центр проекции. Следующие уравнения показывают, как вычисляются x и y:

(22)

(23)

Используя формулы 22 и 23, облако точек может быть легко пере проецировано в любую систему измерения, требуемую от координат пикселя и их соответствующих значений неравенства.

* 1. **Детектирование сферических маркеров**

Одной из основных проблем в области компьютерного зрения является определение формы, расположения или количество экземпляров конкретного объекта. В то время как многочисленные методы извлечения являются общедоступными для поиска круга, один из самых надежных и широко используемых методов является круговое преобразование Хафа. Первоначально преобразование Хафа предназначалось для обнаружения объектов произвольной формы. Позже оно было расширено для детектирования круглых объектов на низко контрастных зашумленных изображениях.

Этот метод сильно зависит от преобразования изображения из оттенков серого в бинарное изображение с использованием методов обнаружения краев объектов, таких как метод Собеля или метод Канни. Цель этого метода состоит в том, чтобы представить искомый объект в виде параметрического уравнения. Параметры этого уравнения образуют пространство Хафа. При проецировании сферического объекта на плоскость изображения, получим круглый объект, который описывается уравнением:

(24)

Тогда из формулы 22 можно получить формулу задающую систему окружностей:

(25)

, где (x0,y0) – это координаты центра окружности, R – радиус это окружности.

Из формулы 25 можно заметить, что для обнаружения сферического объекта на плоскости нужно задаться тремя параметрами, что сделает пространство Хафа трехмерным. Если пространство Хафа имеет n параметров и эти параметры принимают M дискретных значений, то временная функция сложности будет иметь вид . Поэтому метод поиска окружностей Хафа был преобразован в градиентный метод.

Изначально изображение подвергается сглаживанию при помощи следующей свертки:

(26)

Данная свертка приближена к первой производной гауссианы. Далее к изображению применяется детектор границ Канни, результат показан на рисунке 10.

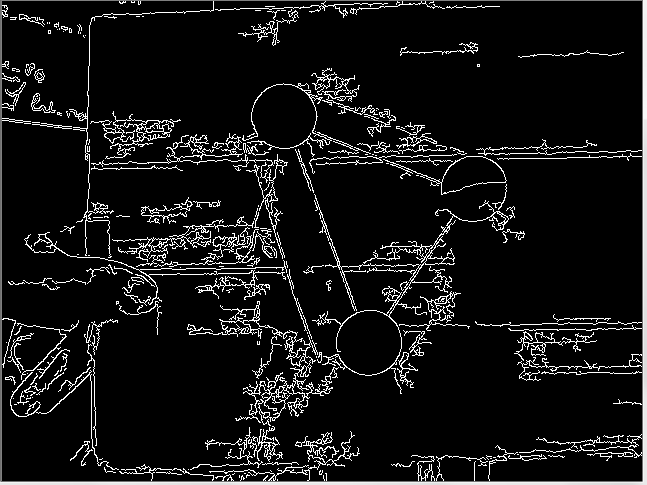
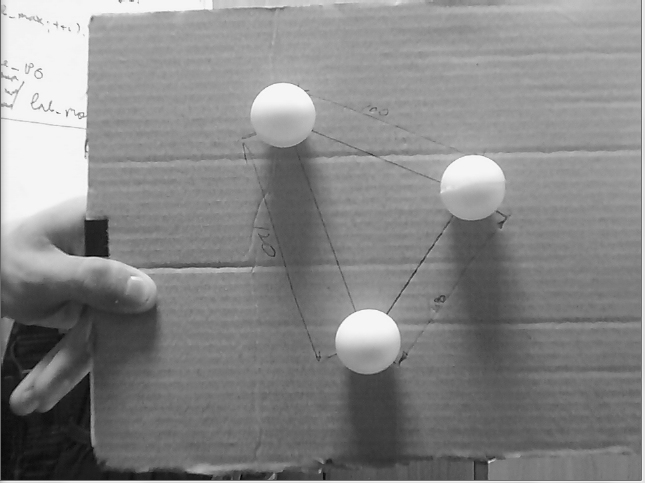
**

Рис. 10. Изображение до применения детектора Кэнни (слева) и результат применения (справа)

На следующем шаге, вычисляется приближенное значения градиента в не нулевых точках. В результате получим градиент для каждой точки границы объектов. Представим формулу 24 в полярных координатах, получим:

(27)

(28)

, где (x0, y0) – координаты центра окружности, R – радиус, а θ – это угол между градиентом и осью *Ox.* Таким образом, избавившись от радиуса, получим уравнение для координат центра окружности:

(29)

Подставляя в формулу 29 координаты не нулевых пикселей с соответствующим углом, можно получить массив координат (x0, y0) вдоль линии. Локальный максимум в данном массиве даст нам центр окружности. После этого для отдельного центра определяются не нулевые точки, лежащие на одном расстоянии.

1. **Рабочее проектирование системы**
   1. **Библиотека OpenCV**

Библиотека OpenCV - это библиотека компьютерного зрения с открытым исходным кодом разработанная корпорацией Intel, и находящаяся в свободном доступе для скачивания и использования в коммерческих и исследовательских областях. Библиотека написана на Си и Си++, и запускается под системами Linux, Windows и Mac OSx. OpenCV активно портируется на другие языки, такие как Matlab, C#, Python и другие. Эта библиотека содержит более 500 функций для большинства различных областей в компьютерном зрении, таких как медицинская визуализация, безопасность, калибровка камер, робототехника и компьютерное зрение. Три основных компонента в OpenCV, которые используются в исследованиях стереозрения – это компоненты CV, HighGUI и CXCORE. Компонент CV используется для обработки изображения и содержит все алгоритмы компьютерной визуализации, которые используются для обработки стереоизображения. Компонент HighGUI используется для чтения, записи и отображения изображений, а также для создания инструментов-ползунков, используемых для регулировки параметров для методов соответствия, показанных на Рисунке 20. CXCORE содержит структуры данных для изображений и матриц, создаваемых в процессе разработки системы.

* 1. **Обзор инструментов системы стереозрения**

Инструменты системы стереозрения используемые в Приложении 1: исходный код инструментов системы стереозрения был разработан автором на Си++ для выполнения задач стереозрения с помощью библиотеки OpenCV. Набор инструментов принимает в качестве аргументов два изображения и файл с калибровочными данными. Калибровочный файл был создан на этапе калибровки, написанной на C++. Приложение обрабатывает изображения автоматически и на выходе мы получаем облако точек. Окно ползунка было создано таким образом, чтобы корректировать различные параметры, связанные с этапом корреляции. Этот процесс показан на технологической схеме на Рисунке 11.

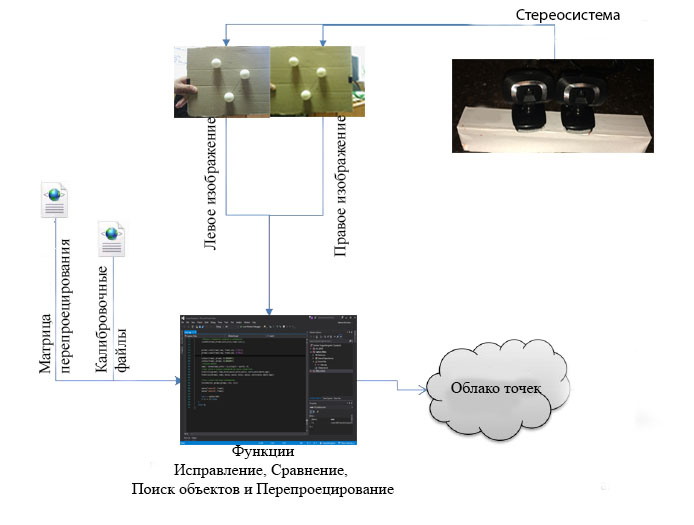


Рис. 11.Диаграмма потоков системы стереозрения

Это изображение показывает рабочий поток инструментов системы стереозрения, который был разработан. Стереосистема посылает левое и правое изображение трехмерной сцены, которую они видят, в программу инструментов системы стереозрения. С этими изображениями, калибровочными данными и данными повторного проектирования полученные при калибровке, программа исправляет изображения, сопоставляет пиксели и пере проецирует двухмерные точки в облако трехмерных точек. Облако точек — это просто набор координат X, Y, Z извлеченный из x и y координат пикселей и несоответствие, связанное с каждой точкой. В следующем разделе описаны некоторые функции OpenCV, которые используются в инструментах системы стереозрения в приложении 1.

* 1. **Инструменты системы стереозрения**

Для того, чтобы исправить два изображения требуется калибровочный файл, который создается на этапе калибровки при помощи функции:

*double stereoCalibrate (InputArrayOfArrays objectPoints,*

*InputArrayOfArrays ImagePoints1,*

*InputArrayOfArrays ImagePoints2,*

*InputOutputArray cameraMatrix1,*

*InputOutputArray distCoeffs1,*

*InputOutputArray cameraMatrix2,*

*InputOutputArray distCoeffs2,*

*Size imageSize,*

*OutputArray R,*

*OutputArray T,*

*OutputArray E,*

*OutputArray F,*

*TermCriteria criteria=TermCriteria(TermCriteria::COUNT+TermCriteria::EPS, 30, 1e-6),*

*int flags=CALIB\_FIX\_INTRINSIC ));*

Данная функция принимает 13 параметров, первый параметр – вектор векторов, хранящий точки калибровочной модели, второй и третий параметр – это вектор векторов проекций точек калибровочной модели, за детектированный первой и второй камерой, далее идут массивы, получаемые по окончании выполнения функции, соответственно матрица первой камеры, вектор коэффициентов искажения для первой камеры, матрица второй камеры, вектор коэффициентов искажения для второй камеры, матрица поворота, матрица перемещения, существенная матрица и фундаментальная матрица. Последний элемент — это критерий алгоритма итерационной оптимизации, который задает сколько итераций должен сделать алгоритм, прежде чем закончить работу, и значение, которого он должен достичь.

После получения внешних и внутренних параметров камеры, данные загружаются в функцию OpenCV stereoRectify, чтобы найти матрицу выпрямления углов поворота 3х3 для левого и правого изображения и матрицу 3х4 уравнений проекции, которая была описана в главе 4.3. Функция stereoRectify [8]выглядит следующим образом:

*void StereoRectify(InputArray****cameraMatrix1****,*

*InputArray****distCoeffs1****,*

*InputArray****cameraMatrix2****,*

*InputArray****distCoeffs2****,*

*Size* ***imageSize****,*

*InputArray****R****,*

*InputArray****T****,*

*OutputArray****R1****,*

*OutputArray****R2****,*

*OutputArray****P1****,*

*OutputArray****P2****,*

*OutputArray****Q****,*

*Int* ***flags****=CALIB\_ZERO\_DISPARITY,*

*double****alpha****=-1,*

*Size****newImageSize****=Size(),*

*Rect\*****validPixROI1****=0,*

*Rect\*****validPixROI2****=0);*

Функция выпрямления принимает 17 параметров, 7 из которых возвращается при вызове функции. Первые четыре параметра – это матрицы камер и вектора искажений для левой и правой камеры соответственно. Следующие два параметра – это матрицы перемещения и вращения; все эти данные получены из калибровочных файлов. Возвращаемые переменные R1 и R2 – это матрицы выпрямления вращения для левой и правой плоскости изображения, матрицы уравнений проекции для левой и правой проекции P1 и P2. Матрица Q – это матрица 4х4 отображения неравенства к глубине. Параметр flag - задан изначально, как CV\_CALIB\_ZERO\_DISPARITY, если это параметр установлен, то функция выпрямит одинаковые координаты у основных точек камер. Alpha - параметр масштабирования. По умолчанию имеет значение -1. Может лежать в промежутке от 0 до 1, при alpha=0 изображение будет выпрямлено с отображением только действительных пикселей (без черных областей (См. рисунок йц)), при alpha=1 выпрямленное изображение упрощается и сдвигается так, что все пиксели из оригинальных изображений сохраняются в выпрямленном изображении. Промежуточные значения дают промежуточный результат. newImageSize – новое разрешение изображения после выпрямления. validPixROI1 и validPixROI2 – дополнительные параметры, которые содержат координаты и габариты прямоугольников внутри выпрямленного изображения, где все пиксели являются действительными (См. рисунок 12).



Рис. 12. Выпрямленное изображение, полученное на этапе стереокалибровки

Параметры, полученные на предыдущем этапе, используются в следующей функции: *InitUndistortRectifyMap(),* которая вызывается для левого и правого изображения по отдельности. Эта функция используется для определения изображения в функции отображения изображения, которая определяет, куда пиксели в оригинальном изображении должны переместиться в неискаженном, исправленном изображении. Она выглядит следующим образом:

*void InitUndistortRectifyMap(InputArray cameraMatrix,*

*InputArray distCoeffs,*

*InputArray R,*

*InputArray* ***newCameraMatrix****,*

*Size size,*

*Int m1type,*

*OutputArray map1,*

*OutputArray map2);*

Данная функция принимает шесть параметров, а возвращает два. Первый и второй параметры – это переменные, соответствующие матрице камеры и коэффициентам искажения для левой и правой камеры, в зависимости от того, для какого изображения вычисляется отображение. R и newCameraMatrix соответствуют матрицам вращения и проецирования, найденым в функции *StereoRectify*[8]*.* Параметр Size – это размер изображения без искажения, m1type – тип выходного массива, который может быть CV\_32FC1 или CV\_16SC2. Последние два параметра - это вектора отображения изображения в направлении x и у соответственно. Эти возвращаемые вектора используются в функции *remap* для того, чтобы отрегулировать пиксели из исходного изображения для получения выпрямленного изображения, чтобы осуществить дальнейшую корреляцию. Функция *remap* выглядит следующим образом:

*void remap(InputArray src,*

*OutputArray dst,*

*InputArray map1,*

*InputArray map2,*

*int interpolatio);*

Первые два параметра - это изображение, которое преобразовываем, и изображение, в которое преобразовываем; конечное изображение будет неискаженным и выпрямленным. Следующие два аргумента - это вектора отображения, которые описывают, где каждый пиксель должен быть сдвинут (направление x и y) от начально изображения до конечного изображения. Так как два вектора отображения не должны быть отображением целого типа, то используется метод интерполяции для определения того, куда в конечном изображении должна быть помещена точка, и так как это значение может быть тип с плавающей точкой, то оно округляется до целого значения и помещается в этом положении пикселя, вызывая пробелы в целевом изображении. Ещё одна причина, по которой требуется провести интерполяцию – это потому, что не все пиксели в итоговом изображении имеют пиксель, отображенный на них, которые также вызывают проблемы в целом изображении. Пятый аргумент описывает, какой метод интерполяции будет применен в данной функции. Интерполяция – это инструмент используемы в графических задачах, таких как изменение масштаба, вращение, геометрические исправления и сжатие.

Для круглых объектов воспользуемся стандартной функцией преобразования Хафа для поиска окружностей, реализованной в библиотеке OpenCV. Функция *HoughCircles* выглядит следующим образом[8]:

*void HoughCircles (InputArray image,*

*OutputArray circles,*

*int method,*

*double dp,*

*double minDist,*

*double param1=100,*

*double param2=100,*

*int minRadius=0,*

*int max Radius=0);*

Данная функция принимает девять параметров, а возвращает один. Первый параметр – это входное изображение, на котором будет проводиться поиск окружностей. Найденные на изображении окружности записываются в массив векторов *circles*, каждый из которых состоит из трех элементов: координата x, координата y и радиус окружности. Переменная *method* имеет только одно значение CV\_HOUGH\_GRADIENT, в она передает какой метод используется при поиске. Он был описан в главе 4.7 и в [7]. Dp – это переменная задающая обратное разрешение массива хранящего центры окружностей, чем у исходного изображения. Если dp=2, то массив, хранящий центры будет в два раза больше. minDist – минимальное расстояние между центрами двух окружностей. Param1 и Param2 значения порога для построения карты границ методом Канни, по умолчанию они имеют значения равные 100. Последние два параметра это минимальный и максимальный радиус детектируемых окружностей.

После нахождения кругов, исправленные изображения передаются на процедуру корреляции для поиска сопоставлений на изображении. Для этого воспользуемся функцией StereoBM::operator().

void StereoBM::operator() (InputArray **left**,

InputArray **right**,

OutputArray **disparity**);

Первые два аргумента – это левое и правое исправленное изображение, прошедшее через функцию *remap.* Следующий параметр – это карта несоответствия, которая содержит смещение пикселя левого изображения по отношению к своему положению на правом изображении. OpenCV использует шестнадцати разрядный метод точной корреляции, а это означает, что каждый пиксель имеет 16 позиций под пикселей, в которых проверяется корреляция точки. Из-за этого, значения, хранящиеся в карте несоответствия, не являются правильными значениями неравенства и должны быть разделены на 16, чтобы получить надлежащее для повторного проецирования и определения глубины. Настройки, которые были описаны ранее в главе 4.5, заносятся в класс StereoBM. Кроме того, эта функция имеет значения для поиска количества неравенства и критерий уникальности для допуска соответствия между точками. Значение количества неравенств используется для максимизации длины поиска в методе корреляции. Это значение оказывает различные эффекты на метод сопоставления, при его понижении соответствия будут находится быстрее так, как метод начинает искать меньшее количество потенциальных совпадений для пикселя. Увеличение числа различий увеличивает площадь поиска, которая замедляет процесс, но также увеличивает возможность совпадения точек, которые могли бы иметь соответствие, но находятся за нижней границей диапазона. Это значение должно изменяться в зависимости от полученного изображения. Переменная уникальность отношения используется для отклонения соответствий, которые не требуются для расчета; эта переменная важна для того, чтобы удалить ложные соответствующие точки. Следующие точки отклоняются, если выполняется следующее неравенство:

(30)

Для настройки основных параметров для функции стереосоответствия и функции поиска был создан инструмент (Рисунок 13), позволяющий менять параметры в реальном времени без перезапуска программы.

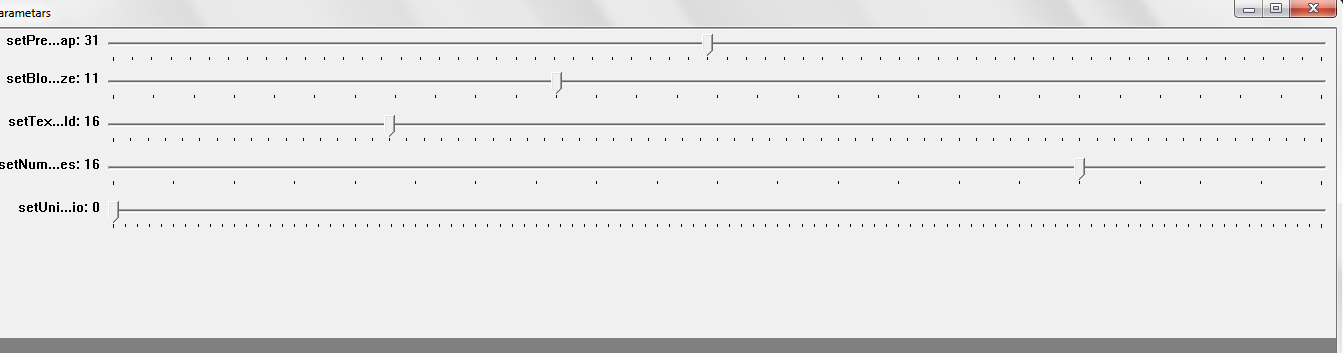


Рис. 13. Инструмент для настройки функции стереосопостовления

После просмотра результатов процесса корреляции, может быть создано облако точек и сохранено. Облако точек создается при с помощью набора координат точек, расположенных на изображении, и несоответствием, найденным в процессе корреляции. Несоответствие для каждой точки используется, чтобы в начале определить расстояние от точки до камеры. Используя измеренное расстояние Z, также определяются значения X и Y для каждого пикселя с помощью уравнений, определенных в главе 4.6. Значения X и Y соответствуют расстоянию в реальном мире от точки до центра камеры в метрах.

* 1. **Выбор камер**

Первый шаг в построении хирургической навигационной системы – это выбор камер. Их основными характеристиками является разрешение, поле зрения и фокусное расстояние, поскольку все эти факторы напрямую влияют на сцену, при нахождении стереосоответствия. В данных системах не рекомендуется использовать камеры с фокусным контролем, потому что изменение в настройках фокуса напрямую сбивает калибровку стереосистемы.

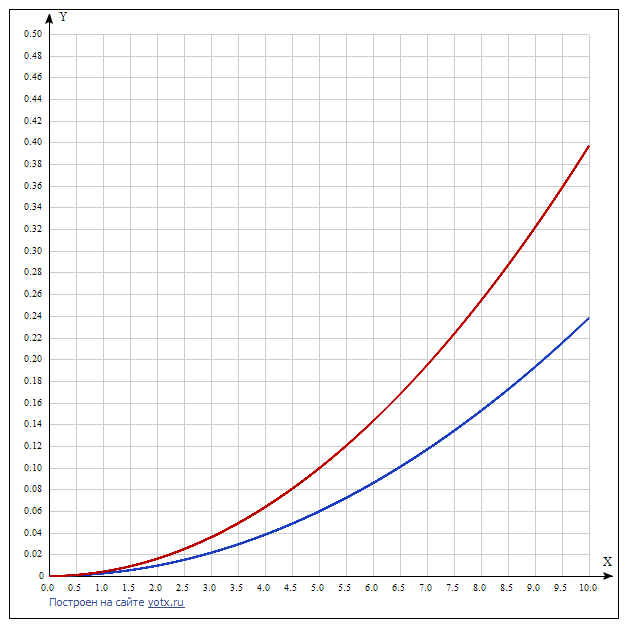
Разрешение камеры играет важную роль в точности системы. Оно часто относится к количеству пикселей в массиве сенсора камеры, который характеризуется полупроводниковой светочувствительной матрицей, содержащей прямоугольный массив светочувствительных элементов. Полезное разрешение – это конечное разрешение любой картинки в реальных масштабах. Полезное разрешение на прямую зависит от фокусного расстояния линз и от расстояния от камеры до фотографируемой поверхности в сцене. Общепринятая единица измерения полезного разрешения – это пиксель на дюйм (PPI).

Поле зрения и фокусное расстояние линз зависят обратно пропорционально. При увеличении фокусного расстояния, поле зрения уменьшается и одновременно повышается эффективное разрешение. Уменьшение фокусного расстояния будет увеличивать размер сцены, которую может захватить камера, но при этом будет снижать эффективное разрешение. При выборе системы стереозрения, должен учитываться параметр поле зрения, именно от него будет зависеть количество совпадений на изображениях с двух камер. Так как, стереоизмерения возможны только для точек трехмерной сцены, которые присутствуют в поле зрения обоих камер.

Для систем стереоизмерений, разрешение и точность полученной карты глубины частично будет зависеть от разрешения полученного изображения. Точность также зависит от определения точек, принадлежащих одному и тому же объекту, при поиске соответствия на изображениях. Если предположить, что соответствия найдены, то разрешение по глубине, Δ𝑍, может быть вычислено используя следующую формулу:

()

В этой формуле, Z – это расстояние от камеры до объекта, f – это фокусное расстояние линз, B – это базовая линия (расстояние на которое левая камера смещена относительно правой камеры), Δ𝑑 - это размер одного элемента пикселя в матрице камеры. В бюджетных матрицах, размер элемента для высоты и ширины будет отличаться. Поскольку поиск в алгоритме соотношения ведется вдоль горизонтальной оси, ширина элемента пикселя используется в качестве значения Δ𝑑. Используя значения фокусного расстояния равного 4.1 мм и размера одного элемента пикселя моей камеры равны 0.005 мм, как написано в паспорте, можно построить график, показывающий разрешение по глубине на различных расстояниях до объекта, используя базовые линии для 30 до 50 см. График показан на рисунке 14.



- базовая линия равна 30 см

- базовая линия равна 50 см

Рис. 14. Графики разрешения по глубине для базовой линии равной 30 и 50 см.

Выбор базовой линии зависит от применения системы. Если базовая линия мала, система подходит для детектирования объектов, которые расположены близко к камере, в то время как большая базовая линия подходит для объектов, расположенных далеко. Однако при этом возникает проблема в том, что перекрытие, между изображениями, теряется с широкой базовой линией, и поэтому страдает стереосоответствие, при просмотре близко расположенных объектов. Уменьшая базовую линию между камерами можно решить данную проблему.

Другой аспект при выборе камеры – это влияние на производительность скорости при работе алгоритма соответствия. Характеристики, такие как разрешение камеры, имеют такое же влияние на производительность процесса соответствия, как и изменение числа различий при поиске. С одной стороны, изображение с большим разрешением, будет обрабатываться дольше, чем изображение с меньшим. С другой – изображение с большим разрешением будет иметь больше точек на миллиметр, чем изображение, полученное из снимка низкого разрешения. При рассмотрении стереосистемы для хирургической навигации, важно своевременное получение трехмерных координат инструмента.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В этой работе, было выдвинуто техническое задание на разработку автоматизированной хирургической навигационной системы для применения её в клинико-диагностических центрах, были выдвинуты требования к системе на основе анализа ее аналогов. Изучив теоретические основы компьютерного зрения были представлены основные алгоритмы, использованные для разработки программного обеспечения. При помощи объектно-ориентированного языка программирования Си++ и библиотеки компьютерного зрения OpenCV была разработана и протестирована программа для детектирования сферических маркеров, определении расстояния до них, представленная в Приложении 1. Были выбраны камеры для обеспечения надлежащего захвата изображения, а также вычислены основные характеристики при моделировании системы. Планируется дальнейшая разработка данной системы и конструирование модели хирургической навигации.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. The Journal of Arthroplasty, Volume 31, Issue 1, -01.01.2016. –P. 92-97.
2. Пат. США CA2278368 A1, Хирургическая навигационная система и метод, использующие аудио обратную связь/. Christian M. Wegner, Daniel B. Karron (США) Заяв. 21.01.1998. Опубл. 23.07.1998. 10с. 9л. ил.
3. Medtronic, Inc. Surgical Technologies, Neurosurgery. StealthStation s7. -2016. -P. 2
4. Airo Mobile Intraoperativ CT. Режим доступа [https://www.brainlab.com/ru/resheniya-dlya-khirurgii/obzor-resheny-na-osnove-platform/airo-mobilnaya-intraoperatsionnaya-sistema-kt/]
5. Janne Heikkilä and Olli Silvén. A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction. Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. Proceedings., 1997 IEEE Computer Society Conference on. -1997. –P. 1106-1112
6. Mikko Kytö, Mikko Nuutinen, Pirkko Oittinen. Method for measuring stereo camera depth accuracy based on stereoscopic vision. UI-ART – 2010. -P. 48-57.
7. Yuen, H. K. and Princen, J. and Illingworth, J. and Kittler, J., Comparative study of Hough transform methods for circle finding. Image Vision Comput. 8 1, pp 71–77 (1990)
8. Gary Bradski, Adrian Kaehler. Learning OpenCV Computer Vision with the OpenCV Library. - O'Reilly Media, 2008. -580p.