

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Алтайский государственный университет»

Институт цифровых технологий, электроники и физики

Кафедра радиофизики и теоретической физики

**Разработка лазерного 3D сканера для
решения задач деревообработки**

(выпускная квалификационная работа (магистерская диссертация))

Выполнил

студент 5.203М группы

_____ А. С. Кулешов

Научный руководитель

к.т.н., доцент

_____ А. Я. Суранов

Выпускная квалификационная
работа защищена

«Допустить к защите»

Заведующий кафедрой РФиТФ

д.ф. -м.н., проф.

_____ А. А. Лагутин

«_____» _____ 2024 г.

«_____» _____ 2024 г.

Оценка _____

Председатель ГЭК

д.т.н., проф.

_____ В. Я. Федянин

Барнаул, 2024

Реферат

выпускной квалификационной работы (магистерская
диссертация)

«Разработка лазерного 3D сканера для решения задач
деревообработки».

Работа 44 с., 31 рис., 15 источников.

PYTHON, 3D-СКАНЕР, ЛАЗЕР, ИЗМЕРЕНИЯ, ВИДЕОКАМЕРА,
АВТОМАТИЗАЦИЯ.

Объектом исследования является система стационарного лазерного 3D-сканирования на основе лазера, камеры и Raspberry Pi 4.

Целью данной работы является разработка стационарного лазерного 3D-сканера.

Во время работы были исследованы различные варианты расположения камеры и лазера в конструкции 3D-сканера, был проведен анализ различных методов обработки изображений и создания 3D моделей, разработан и реализован алгоритм получения трёхмерных размеров объекта по изображению, а также оценена точность созданной модели.

Содержание

Введение	4
1 Анализ современного состояния элементной базы	5
1.1 Виды 3D сканеров	5
1.2 Современные аналоговые системы	10
1.3 Компоненты системы	10
1.4 Алгоритмы обработки изображения и построения 3D моделей	14
1.4.1 Морфологические операции	14
1.4.2 Алгоритмы скелетизации	15
1.4.3 Алгоритмы упрощения полигональной цепи	16
1.4.4 Алгоритмы реконструкции поверхности	17
2 Разработка автоматизированной системы дистанционного определения размеров деловой части необрезного пиломатериала	19
2.1 Выбор конструкции системы	19
2.1.1 Расположение лазера под углом, камеры вертикально	19
2.1.2 Камера и лазер вертикально	21
2.1.3 Камера под углом, лазер прямо	23
2.1.4 Выбор оптимальных параметров конструкции	25
2.2 Калибровка	29
2.3 Фильтр красного	30
2.4 Преобразование линии на изображении	32
2.5 Получение и соединение данных с нескольких камер	35
3 Тестовые измерения	38
3.1 Создание 3D модели	38
3.2 Оценка параметров сканера	39

Заключение	41
Список литературы	42

Введение

Повсеместная цифровизация затрагивает всё больше сфер деятельности человека. В цифровизация производства позволяет сделать его более эффективным. Это достигается с помощью устранения человеческого фактора, замедляющего множество операций на производстве и более эффективного хранения данных о сырье и производимом товаре.

Так, например, в настоящее время в деревообрабатывающей промышленности существует множество операций, в которых участвует человек. Это вносит ограничение в скорость работы линий и уменьшает выход продукции из-за субъективности. Для устранения человеческого фактора необходимо автоматизировать такие процедуры. Одной из таких процедур является измерение сечения [1] пиломатериалов на протяжении всей длины. Помимо этого, полезным может быть знание о форме объектов. Это позволит выбирать для них оптимальные способы обработки.

Цель работы: Разработка автоматизированной системы измерения и моделирования трёхмерных объектов на основе лазера, камеры и одноплатного компьютера Raspberry Pi.

Решаемые задачи:

1. Выбор оптимальной конструкции сканера.
2. Разработка и реализация алгоритма получения трёхмерных размеров объекта по изображению.
3. Создание 3D-модели из полученных измерений.

1 Анализ современного состояния элементной базы

1.1 Виды 3D сканеров

Для получения 3D-моделей в настоящее время применяют различные методы измерения формы (рис.1) [2, 3]. Наиболее распространенные - активные методы с применением лазеров или структурированного света. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки.

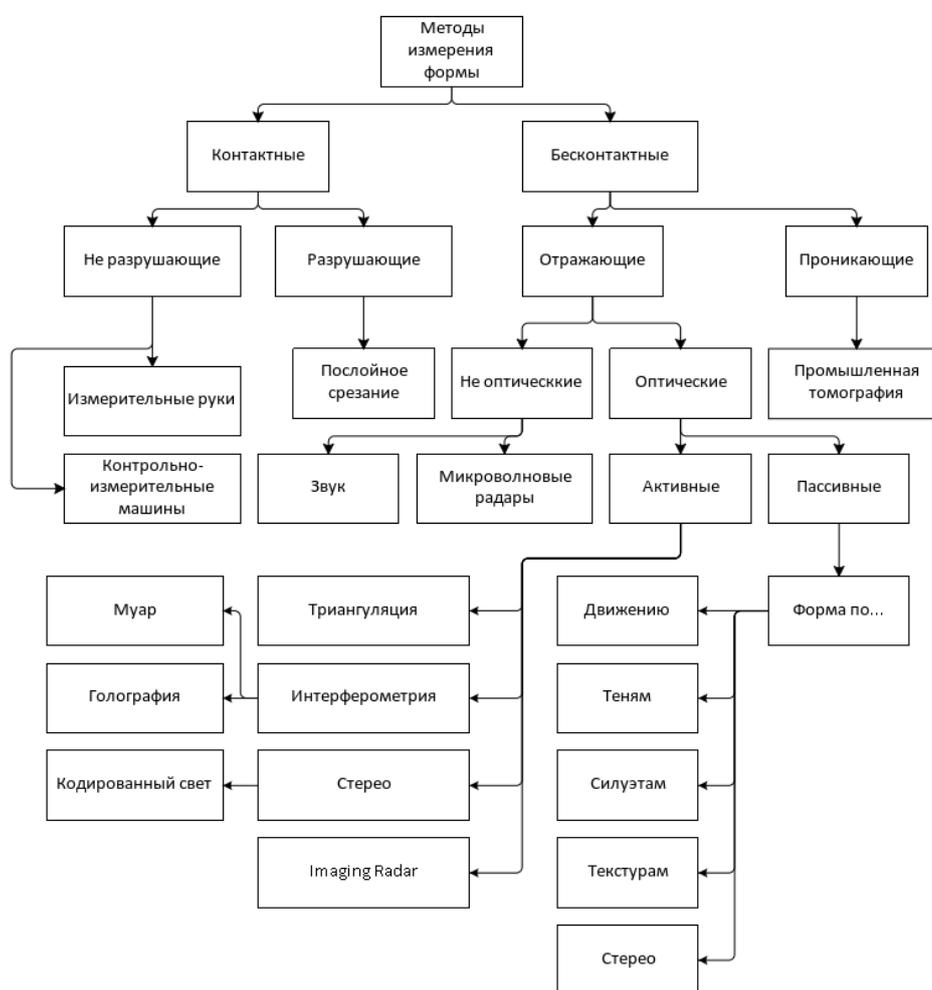


Рис. 1: Основные методы, применяемые для получения трёхмерных моделей

Методы измерения формы делятся на контактные и бесконтактные.

Контактные сканеры – это устройства, которые сканируют поверхность объекта путем прямого контакта с ним. Они используют физическое соприкосновение с объектом для считывания его характеристик. Контактные сканеры могут иметь различные формы и конструкции, включая ручные устройства, стационарные столы или платформы для сканирования (рис.2). Процесс сканирования с контактными сканерами обычно требует надавливания на устройство по всей поверхности объекта для того, чтобы зарегистрировать его форму и текстуру. Контактные сканеры широко применяются в различных областях, таких как реставрация и реконструкция исторических объектов. Они обладают высокой точностью сканирования при работе с твердыми и плоскими объектами. Однако на производстве такие типы сканеров использовать проблематично из-за ограничений по размеру, необходимости прямого контакта с объектом и долгого времени сканирования.



Рис. 2: Контактный 3D-сканер

Бесконтактные сканеры делят на проникающие и отражающие.

К проникающим относят такой вид сканирования как промышленная томография (рис. 3). Это сканирование с помощью образования трех-

мерных изображений внутренней структуры объектов путем использования рентгеновского излучения или гамма-излучения. Промышленная томография аналогична медицинской компьютерной томографии (КТ), но применяется для неразрушающего контроля различных материалов и изделий в промышленности. Промышленная томография позволяет обнаруживать дефекты, внутренние трещины, включения, контролировать соединения, размеры и геометрические параметры объектов, а также проводить анализ материалов без необходимости разрушительного тестирования. Минусами такого способа сканирования является долгое время сканирования, очень высокая стоимость оборудования, а также опасность излучения.

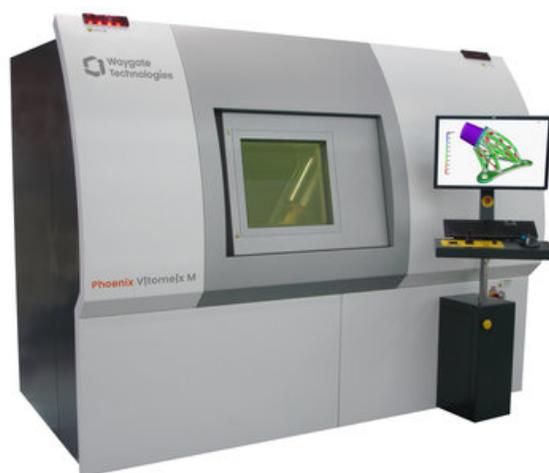


Рис. 3: Промышленная томография

Отражающие сканеры делят на оптические и не оптические. К не оптическим относят микроволновые и звуковые сканеры.

Принцип работы микроволновых сканеров основан на отправке коротких импульсов микроволновой энергии в пространство и измерении времени, за которое эти импульсы отражаются от объектов и возвращаются к датчику. По задержке и интенсивности этих отраженных сигналов можно создать изображение объектов или определить их место-

положение, скорость и другие параметры. Такие сканеры имеют высокую точность и устойчивость к различным температурам, влажности и освещенности, однако использование на производствах, связанных с обработкой дерева затруднительно из-за высокого поглощения микроволн древесиной, а также помех от других излучающих микроволновых устройств.

Звуковые сканеры работают по такому же принципу, но используют не электромагнитное излучение, а ультразвуковые волны. Одной из основных проблем использования данного сканера на производстве являются помехи из-за шума и вибраций, которые являются неотъемлемой частью многих производств, в том числе и деревообрабатывающих. На рисунке 4 показан один из таких сканеров.

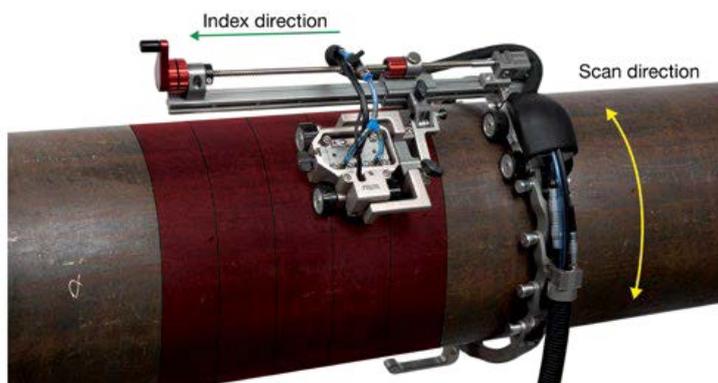


Рис. 4: Ультразвуковой 3D-сканер

Оптические сканеры разделяются на пассивные и активные.

Пассивные оптические сканеры (рис. 5) проводят сканирование объектов без использования активного источника света, такого как лазер. Вместо этого они работают путем приема отраженного света внешнего источника от поверхности объекта. Преимуществом таких сканеров является их низкое энергопотребление. Однако такие сканеры являются медленными и не точными при работе на необходимых в производстве расстояниях.

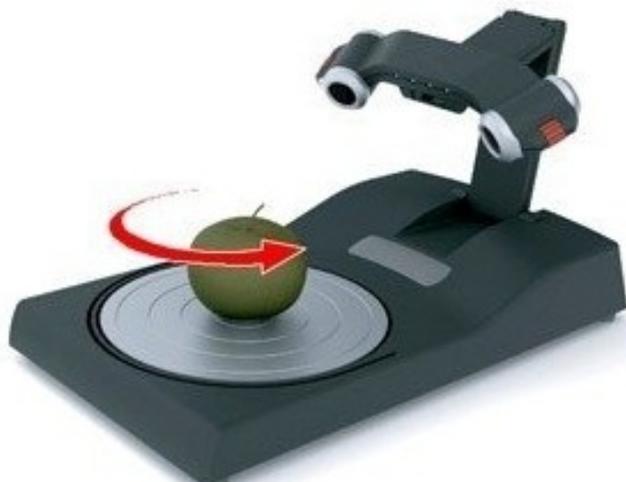


Рис. 5: Пассивный 3D-сканер

Активные оптические сканеры для сканирования объектов используют активный источник света, такой как лазер или светодиод. Излучение падает на поверхность объекта и затем детектором регистрируются отраженный свет для создания изображения объекта. Такие сканеры являются быстрыми и точными, но имеют высокую стоимость и сложность в обслуживании.

На деревообрабатывающем производстве есть ряд особенностей, которые стоит учитывать при выборе сканера. Так, например, объектами сканирования могут быть доски, бруски, бревна и прочие достаточно большие объекты, что накладывает условия на величину рабочей зоны, а также на вид сигнала, используемого для сканирования. Также необходимо учитывать большое количество шумов и вибраций, присутствующих на производствах. Важным критерием является скорость работы. Необходимо, чтобы сканирование не тормозило линию. Высокая детализированность модели при этом не является обязательной. Исходя из всех приведенных особенностей, для использования на деревообрабатывающем производстве наиболее подходящим вариантом является лазерное сканирование.

1.2 Современные аналогичные системы

В настоящее время существуют 3D-сканеры, используемые на деревообрабатывающих производствах, однако такие системы являются сложными в эксплуатации и дорогими в производстве (рис. 6).



Рис. 6: Лазерный 3D-сканер

Существующие сканеры имеют характеристики, лежащие в следующих пределах:

- Минимальный диаметр: 50 мм.
- Максимальный диаметр: 800 мм
- Погрешность измерений диаметра ± 3 мм.
- Точность измерения длины ± 2 см
- Частота сканирования от 10 Гц

1.3 Компоненты системы

Для простоты обслуживания компоненты системы сканера должны быть доступными и не слишком дорогими. Основой для системы, подходящей к данным требованиям, был выбран одноплатный компьютер

Raspberry Pi 4 Model B (рис. 7). Он является производительным и удобным вариантом, подходящим под нужды создаваемой системы. Он поддерживает операционную систему Linux, что позволяет производить тонкие настройки платы, а также язык программирования Python [5], который является хорошим решением для создания программного обеспечения, предназначенного для обработки изображений [6].



Рис. 7: Плата Raspberry Pi 4

Производителем были указаны [7] следующие характеристики компьютера:

- Однокристальная система: SoC Broadcom BCM2711
- Центральный процессор: 4-ядерный 64-битный CPU на ARM Cortex A72 с тактовой частотой 1,5 ГГц
- Графический процессор: VideoCore VI GPU с тактовой частотой 500 МГц
- Оперативная память: 1 / 2 / 4 / 8 ГБ LPDDR4-3200 SDRAM
- Порт для камеры: Camera Serial Interface (MIPI CSI)
- Порты ввода-вывода GPIO: 40

- 6 × UART интерфейсов
- 6 × I2C мастер-интерфейсов
- Напряжение питания: 5 В
- Максимальный ток потребления: 3 А

Для создаваемой системы важным параметром является количество ядер процессора. Поскольку по умолчанию программы на Python используют одно ядро, то в трудоёмких задачах, таких как обработка изображения можно использовать дополнительные ядра для параллельных регистрации и обработки изображений с нескольких источников. Ещё одним важным плюсом Raspberry Pi 4 является количество USB-портов, позволяющих подключать множество камер одновременно.

Следующим важным компонентом является камера. Камеры, используемые в системе, должны соответствовать следующим требованиям:

- Высокое качество изображений.
- Высокая частота кадров.
- Широкий угол обзора камеры или широкоугольный объектив.

От частоты кадров во многом будет зависеть скорость работы системы, а от качества изображений точность измерения физических параметров при сканировании. При малом угле обзора камеру необходимо сильно удалять от сканируемого объекта, что является неудобным.

В качестве основной в системе используется высококачественная камера Raspberry Pi HQ Camera (рис. 8).



Рис. 8: Raspberry Pi HQ Camera

Технические характеристики, предоставленные производителем [8]:

- Датчик изображения: Sony IMX477R
- Тип сенсора: КМОП-матрица с обратной подсветкой
- Размер матрицы: 1/2,3" (6,3×4,7 мм)
- Разрешение: 12,3 Мп
- ИК-фильтр: встроенный Ноуа CM500
- Интерфейс: MIPI CSI-2
- Запись видео: 1080p30, 720p60 и 640x480p60/90
- Регулировка заднего фокуса: ручная (12,5–22,4 мм)

В качестве боковых камер используются веб-камеры, соответствующие характеристикам, которые подключаются по USB-интерфейсу.

1.4 Алгоритмы обработки изображения и построения 3D моделей

1.4.1 Морфологические операции

Одним из основных способов для выделения объектов и удаления шумов при обработке изображений являются морфологические преобразования. Морфологические преобразования используют форму и структуру объектов на изображении. Они применяются для изменения геометрических свойств изображения, таких как размер, форма, ориентация и т. д. Основные морфологические операции включают в себя дилатацию, эрозию, открытие и закрытие.

- Дилатация прибавляет к объектам изображения пиксели на их границах, что приводит к увеличению размера объектов. Дилатация используется для заполнения маленьких просветов вокруг объектов и расширения контуров.
- Эрозия удаляет пиксели на границах объектов, уменьшая их размер. Эрозия используется для удаления шумов, более тонкой выделения областей объектов и разделения объектов, находящихся слишком близко.
- Открытие представляет собой комбинацию эрозии, за которой следует дилатация. Она уменьшает размер объектов и удаляет мелкие дефекты на изображении, при этом сохраняя общую форму объектов.
- Закрытие применяется путем комбинации дилатации, за которой следует эрозия. Она используется для заполнения маленьких дырок внутри объектов или соединения близко расположенных объектов.

1.4.2 Алгоритмы скелетизации

Одним из способов распознавания формы объекта на изображении является построение скелета. Скелетом объекта называется множество точек, равноудалённых от границ объекта. Методы скелетизации разделяются на несколько типов [9]:

- Модификации алгоритма эрозии
- Различные виды векторизации
- Фильтрация
- Морфологические преобразования
- Деформирование модели

Наиболее распространенные алгоритмы - основанные на эрозии, так как они легко реализуемы и обладают большей скоростью работы. Одним из таких алгоритмов является алгоритм Зонга-Суня [10]. Суть алгоритм Зонга-Суня заключается в итеративном утоньшении объекта до скелета путём введения матрицы:

$$\begin{pmatrix} P_9 & P_2 & P_3 \\ P_8 & P_1 & P_4 \\ P_7 & P_6 & P_5 \end{pmatrix}$$

, где черный пиксель имеет единичное значение, а белый - нулевое.

Пиксель P_1 удаляется, если:

1. $2 \leq P_2 + P_3 + \dots + P_8 + P_9 \leq 6$
2. $S(P_1) = 1$, где $S(P_1)$ - количество последовательностей 01 в замкнутом ряду $P_1 - P_9$
3. $P_2 * P_4 * P_8 = 0$
4. $P_2 * P_6 * P_8 = 0$

1.4.3 Алгоритмы упрощения полигональной цепи

Для уменьшения объема данных при обработке изображений применяют различные упрощения. Одним из таких упрощений является уменьшение количества точек в полилиниях. Существует множество алгоритмов позволяющих провести данную операцию [11]. Одним из самых популярных является алгоритм Дугласа-Пекера, основанный на упрощении полилинии на основе заданного максимального расстояния (ϵ) между исходной и упрощенной полилиниями. Суть данного алгоритма заключается в следующем:

- Первая и последняя точка остаются неизменными
- Находится точка наиболее удалённая от соединяющего начало и конец отрезка
- Если точка находится на расстоянии меньшем, чем ϵ , то все точки, которые еще не были отмечены к сохранению, могут быть выброшены из набора, и получившаяся прямая сглаживает кривую с точностью не ниже ϵ
- Если же это расстояние больше ϵ , то алгоритм рекурсивно вызывает себя на наборе от начальной точки до данной и от данной до конечных точек.

Пример работы алгоритма показан на рисунке 9. На данном рисунке красными точками показаны выброшенные точки, а синими - оставшиеся после упрощения.

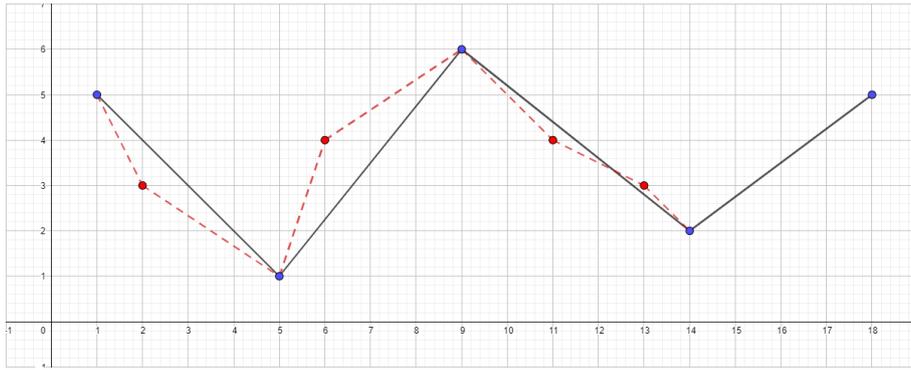


Рис. 9: Пример работы алгоритма Дугласа-Пекера

1.4.4 Алгоритмы реконструкции поверхности

Для визуализации полученных данных в виде 3D модели необходимо задать грани между точками. Существует множество различных алгоритмов для реконструкции поверхности из облака точек [12].

Одним из наиболее эффективных для большого количества точек является - триангуляция Делоне. Это метод разбиения плоскости на треугольники таким образом, чтобы никакие точки окружности, описанной вокруг любого треугольника, не содержались внутри других треугольников. В трехмерном пространстве метод выполняется на основе тех же основных принципов, что и в двумерном случае, но с учетом третьей координаты. Пример триангуляции Делоне на плоскости приведен на рисунке 10.

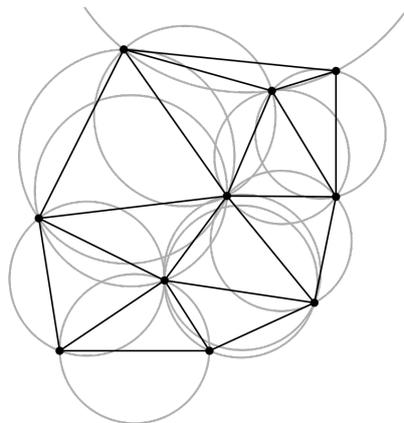


Рис. 10: Пример работы триангуляции Делоне

Другим популярным методом построения 3D моделей является метод построения выпуклой оболочки. С помощью данного алгоритма находят-ся точки, которые образуют наименьшую выпуклую область, содержащую все точки множества. Данный метод имеет высокую производительность и дает хорошие результаты на выпуклых объектах без впадин. На рисунке 11 приведен пример работы алгоритма на плоскости.

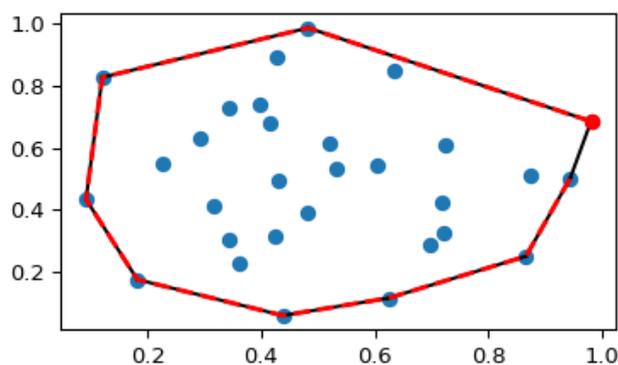


Рис. 11: Пример построения выпуклой оболочки

2 Разработка автоматизированной системы дистанционного определения размеров деловой части необрезного пиломатериала

2.1 Выбор конструкции системы

От способа установки камеры и лазера будет изменяться зависимость измеряемой высоты объекта от смещения лазера на изображении.

2.1.1 Расположение лазера под углом, камеры вертикально

Первым вариантом конструкции сканера является вариант с лазером, расположенным под углом, и вертикально расположенной камерой. Схема варианта расположения показана на рисунке 12. На данном рисунке:

- Синими линиями показана зона видимости камеры
- Красной линией изображен луч лазера
- Зеленой линией перпендикуляр к поверхности стола
- Коричневой линией искомая высота объекта в точке
- Фиолетовая линия - линия проекции точки столкновения лазера с объектом на стол

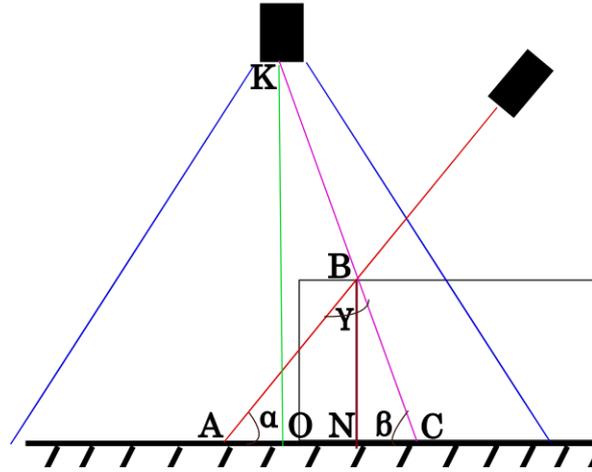


Рис. 12: Схема расположения с вертикальной камерой и лазером под углом

При столкновении лазера с объектом на изображении с камеры будет происходить смещение точек. Расстояние, на которое сместится точка на изображении, будет соответствовать расстоянию AC. Расстояние OK и угол α задаётся конструкцией сканера. При пересчёте расстояния AC из пикселей в мм, можно решить треугольник ABC и найти высоту BN.

$$BN(AC) = \frac{AC \sin^2(\beta)}{\sin(\alpha + \beta)}$$

,где

$$\beta = \arctg\left(\frac{KO}{AC - AO}\right)$$

Данная зависимость приведена на графике 13. Для построения графика приняты следующие значения констант: $\alpha = 1$ рад, $AO = 100$ мм, $KO = 1000$ мм. Такие значения констант близки к значениям для реальной конструкции сканера.

Зависимость высоты объекта от смещения точек лазера на изображении

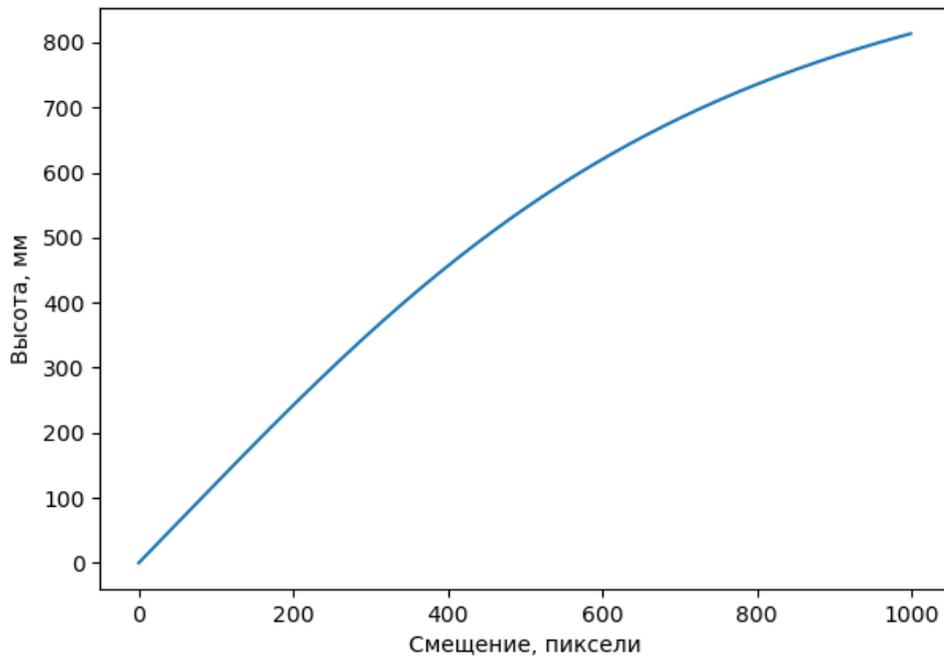


Рис. 13: График зависимости измеренной высоты от смещения пикселей при расположении камеры вертикально и лазера под углом

Видно, что зависимость при параметрах, заданных таким образом, является пологой. Это позволяет лучше различать близкие высоты. Из-за такого преимущества для построения сканера был выбран данный вариант.

2.1.2 Камера и лазер вертикально

Самым простым вариантом конструкции сканера является вертикальное расположение для камеры и лазера. Схема варианта при данном расположении компонент системы показана на рисунке 14. Обозначение линий соответствует обозначению линий на схеме на рисунке 12.

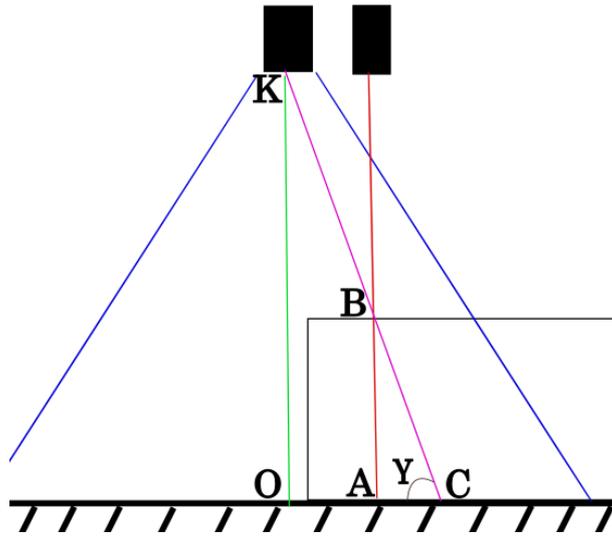


Рис. 14: Схема расположения с вертикальной камерой и лазером

Также, как и прошлой схеме нам известно расстояние OK , а также известно из изображения расстояние OA и AC . Так как треугольник OKC является прямоугольным, то можно найти все остальные неизвестные, включая высоту внесенного в сканер объекта.

$$BN(AC) = \frac{AC \cdot OK}{OA + AC}$$

Данная зависимость приведена на графике 15. Для построения графика приняты следующие значения констант: $AO = 100$ мм, $KO = 1000$ мм. Такие значения констант близки к значениям для реальной конструкции сканера.

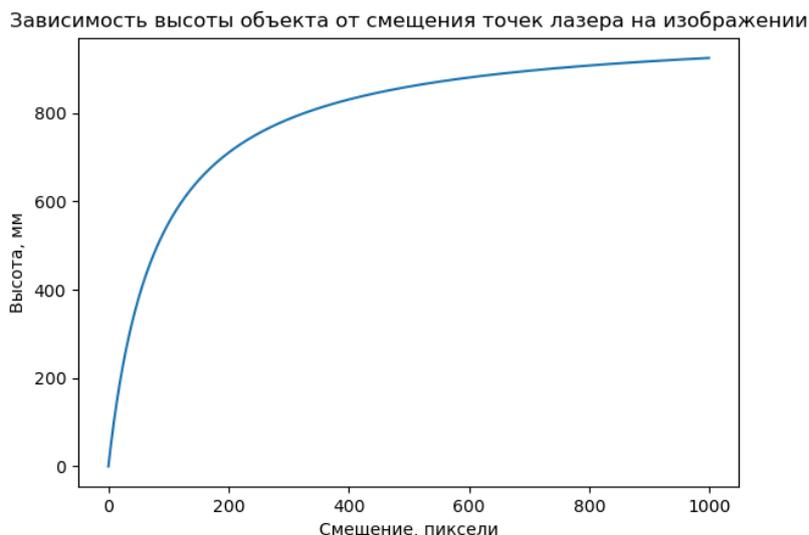


Рис. 15: График зависимости измеренной высоты от смещения пикселей при расположении камеры и лазера вертикально

На практике такой вариант является неудачным из-за малого изменения формы линии лазера на изображении. Для увеличения изменения необходимо или уменьшать расстояние между камерой и столом, или увеличивать расстояние между камерой и лазером. Но при увеличении расстояния между камерой и лазером, лазер уходит за пределы видимости камеры, а уменьшение расстояния между камерой и столом накладывает ограничения на высоту сканируемого объекта.

2.1.3 Камера под углом, лазер прямо

Последним вариантом конструкции является расположение камеры под углом, а лазера вертикально. Схема изображена на рисунке 16. Здесь, в отличие от предыдущих схем, зеленой линией изображена проекция точки столкновения лазера и объекта на стол, а коричневой линией - перпендикуляр к камере от поверхности стола.

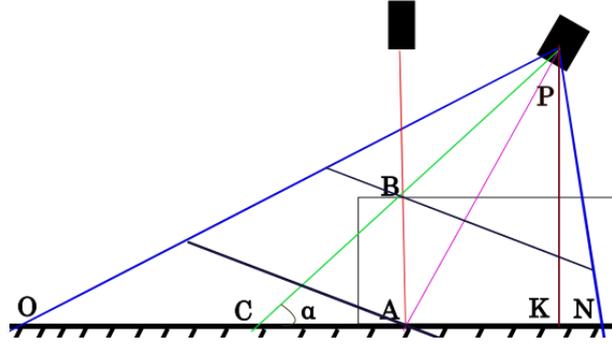


Рис. 16: Схема расположения с вертикальным лазером и камерой под углом

При известной высоте подвеса камеры, длины зоны видимости камеры и расстояния от камеры до зоны видимости с помощью смещения лазера на изображении можно найти угол падения проекции столкновения лазера с объектом, а также высоту сечения объекта, попавшего под лазерную линию.

$$BN(AC) = \frac{AC \cdot PK}{AK + AC}$$

Данная зависимость повторяет зависимость для прошлого варианта. Но за счёт наклона камеры относительно стола и объекта деформация линии лазера будет значительнее. Недостатком такой схемы является непостоянство коэффициента перевода пикселей в миллиметры, связанное с наклоном камеры относительно стола. Зависимость коэффициента от расстояния до объекта линейная $k(x) = a_0 + b_0x$. Расстояние до объекта изменяется по формуле $t = \frac{PK}{\sin(\alpha)}$. При учёте всех зависимостей получим следующее выражение для высоты среза объекта от смещения лазера на изображении:

$$BN(AC) = \frac{PK_{mm} \cdot AC_{pix} \cdot k(t(\alpha(AC_{pix})))}{AK_{mm} + AC_{pix} \cdot k(t(\alpha(AC_{pix})))}$$

,где:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{PK \cdot k^{-1}(PK)}{AK \cdot k^{-1}(AK) + AC} \right)$$

На графике 17 приведена данная зависимость для $AK = 100$ мм,

$PK = 1000$ мм:

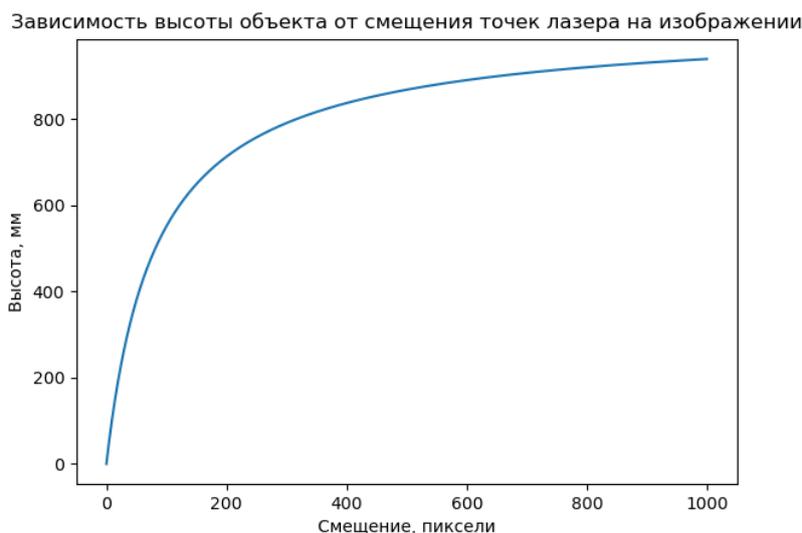


Рис. 17: График зависимости измеренной высоты от смещения пикселей при расположении лазера вертикально и камеры под углом

Такая зависимость сильно зависит от точности определения многих параметров, вследствие чего общая погрешность измерения высоты увеличивается. Также минусом является то, что у зависимости в начале имеется участок, на котором при большом увеличении высоты почти не изменяется смещение линии, что приводит к тем же проблемам, что и в варианте с вертикальным расположением камеры и лазера.

2.1.4 Выбор оптимальных параметров конструкции

Для выбранной конструкции необходимо определить параметры, при которых разрешение высот в измеряемом диапазоне будет наибольшим, а также диапазон измеряемых высот был максимален. Такими параметрами являются: угол наклона лазера, расстояние между камерой и лазером.

Для выбора оптимального расстояния угла наклона лазера относительно нормали к земле была проведена серия измерений для нахождения характеристики смещения лазерной линии при изменении высоты

сканируемого объекта для различных углов наклона.

Для измерения данной характеристики камера устанавливалась над точкой проекции лазерной линии на экран, высота подвеса камеры и лазера 60 см. Для измерения высоты объекта использовался датчик расстояния, подвешенный на высоте подвеса камеры. Результаты эксперимента представлены на рисунке 18. Зависимость для каждого угла является усреднённым значением по серии опытов. Все результаты аппроксимируются полиномами 2 степени с величиной достоверности аппроксимации около 0,98.

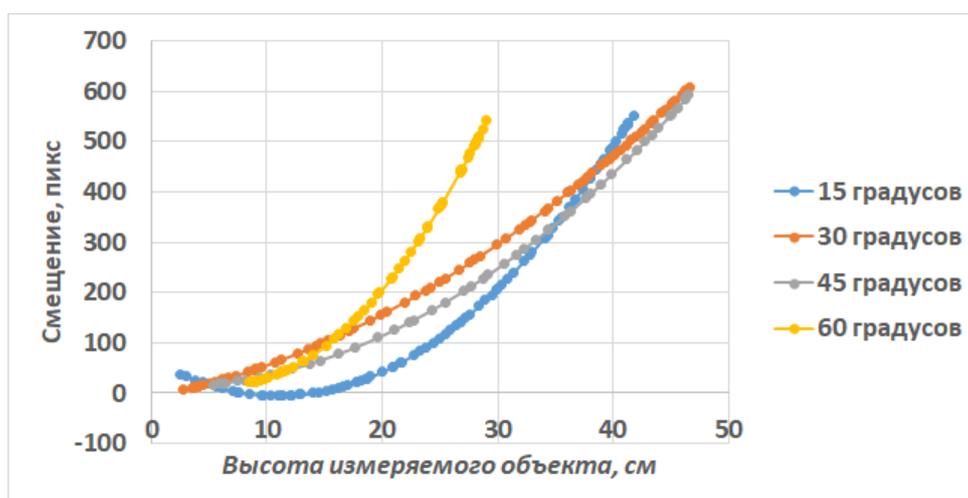


Рис. 18: График зависимости смещения лазерной линии при изменении высоты измеряемого объекта для набора высот

При угле 15 градусов на высотах до середины измеряемого диапазона смещение пикселей на изображении камеры имеет незначительные изменения, что вносит неточность в измерения объектов с высотой ниже середины измеряемого диапазона.

В зависимости, соответствующей углу 60 градусов, скорость смещения пикселей быстро растёт. В следствие этого верхний предел диапазона измерений уменьшается, а точность измеряемых высот при их приближении к верхнему пределу увеличивается.

Зависимости для 45 и 30 градусов являются пологими на всём измеряемом диапазоне. Это даёт возможность проводить более измерения с

приблизительно одинаковой точностью во всём диапазоне. Так как характеристика для 30 градусов ближе к линейной, чем характеристика для 45 градусов, то такой угол является наиболее близким к оптимальному. Последующие измерения будут проводиться при 30 градусах наклона лазера.

Для выбора оптимального расстояния между камерой и лазером экспериментальным путём были получены зависимости смещения лазерной линии на изображении в зависимости от расстояния между камерой и лазером для набора высот. Результат измерений показан на рисунке 19. Для измерения данной зависимости под лазерный луч помещались объекты различных высот. Датчик расстояния, подвешенный на штативе с камерой, измерял расстояние до экрана, подвешенного на штативе с лазером. После старта измерения штатив с камерой и датчиком приближался к штативу с лазером. Лазер и камера подвешены на расстоянии 60 см от земли, угол обзора камеры 100 градусов, угол наклона лазера 30 градусов. Расстояние между камерой и лазером изменялось от 80 до 10 см. Данные с датчика и камеры сопоставлялись по времени, после чего были аппроксимированы.

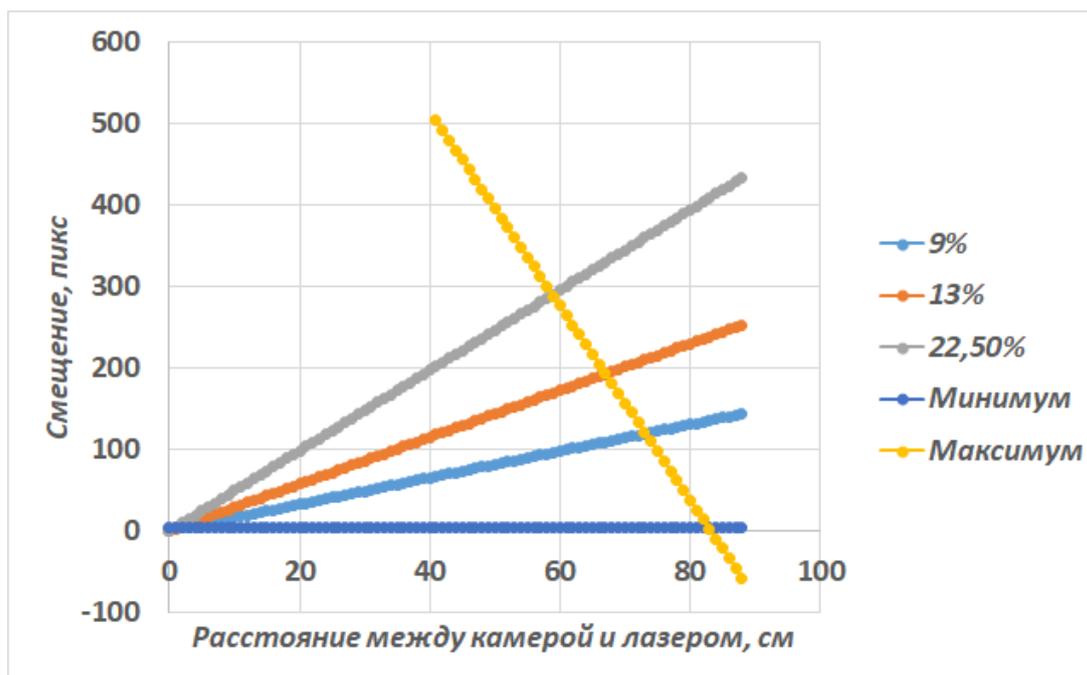


Рис. 19: Зависимость смещения точек от расстояния между камерой и лазером для набора высот

Набор высот на графике выражен в процентах от высоты подвеса камеры и лазера. Желтой линией обозначено максимальное возможное смещение для данного расстояния. Все высоты, зависимость смещения которых находится ниже данной точки попадают в измеряемый диапазон. Снизу данный диапазон ограничен минимальным смещением, обозначенным синей линией, при котором детектирование смещения возможно. Видно, что по мере увеличения измеряемых высот, увеличивается коэффициент наклона прямых. В следствие этого для возможности измерения в большем диапазоне высот оптимальным решением будет являться установка расстояния между лазером и камерой 30 см для данной высоты подвеса камеры. На данном расстоянии высоты имеют большой диапазон значений и приемлемое разрешение относительно ближайших высот в нижнем диапазоне. При таком расстоянии камера находится над лазерной линии в не искривленном состоянии.

2.2 Калибровка

При использовании широкоугольных камер и объективов на изображении появляются искажения, в связи с чем необходимо проводить калибровку камеры. Для этого необходимо сначала устранить радиальную дисторсию, являющуюся одним из источников погрешности в системе. С этой целью в данной работе использовался известный метод калибровки камеры по шахматному полю [13]. Так как дисторсия является свойством объектива и является неизменной для всех кадров, регистрируемых камерой, то становится возможным заранее рассчитать коэффициенты для её устранения. После устранения радиальной дисторсии производилось определение зависимости масштабных коэффициентов пересчёта пикселей в миллиметры от расстояния до объекта. В качестве «эталонного» изображения на этом этапе использовался набор чёрно-белых полос, ориентированных вдоль доски. График такой зависимости показан на рисунке 20.

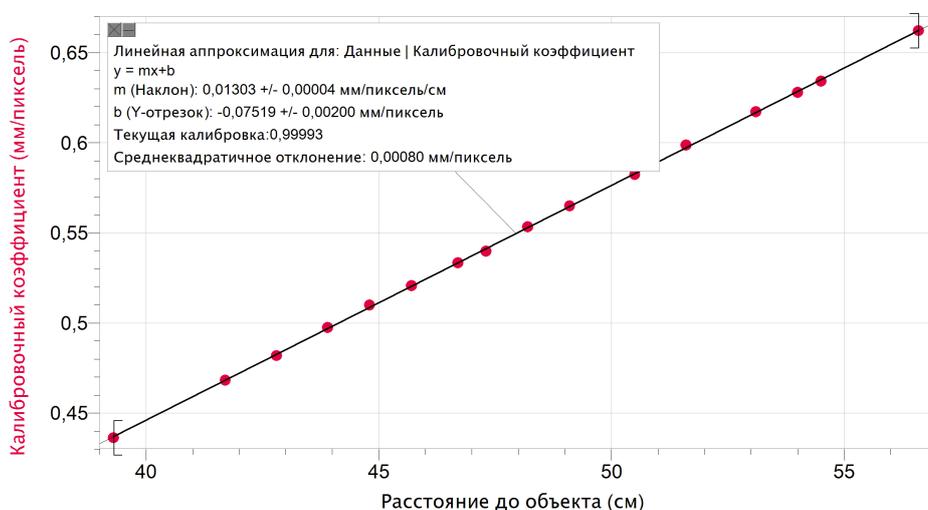


Рис. 20: График зависимости величины калибровочного коэффициента от расстояния до объекта

Калибровочный коэффициент линейно зависят от высоты, что упрощает дальнейшие расчёты. Эта зависимость остаётся неизменной для

всех кадров, что даёт возможность использовать заранее найденные коэффициенты для ускорения работы программы.

2.3 Фильтр красного

Сканирование начинается с выделения линии лазера на изображении. Для этого в первую очередь необходимо перейти к бинарному изображению. Такой переход может быть осуществлен с помощью нескольких путей:

- Перевод изображения в оттенки серого путём перехода к усредненным значениям по каналам и последующей после этого бинаризации по порогу яркости.
- Наложение на изображение цифрового фильтра цвета искомого предмета.

При использовании первого варианта возникает ряд проблем. Лазерная линия может быть недостаточно яркой на остальном фоне, что приводит к тому, что часть линии может не зарегистрироваться или зарегистрироваться другие светлые области. Оба эти случая приводят к тому, что в последующем на изображении будет сложно определить искомый контур. Данную проблему можно решить, если регистрируемую область объекта оградить от всех внешних источников света, кроме лазера. С другой стороны, при недостаточном освещении вокруг лазерной линии на изображении появляется светлая зона, которая после бинаризации будет являться помехой для более точного измерения поперечного сечения объекта.

При использовании второго способа яркость других объектов в кадре не является проблемой. Однако при случайном появлении в кадре другого объекта сходного по цвету с лазером, существует вероятность ошибки при выборе контура для последующего анализа.

Для решения данных проблем есть смысл использовать на камере оптический фильтр красного света. Экспериментальным путём был подобран фильтр, с помощью которого на изображении исчезает всё, кроме лазерной линии. Таким фильтром оказался фильтр КС-15 [15]. Спектральная характеристика пропускания данного фильтра приведена на рисунке 21.

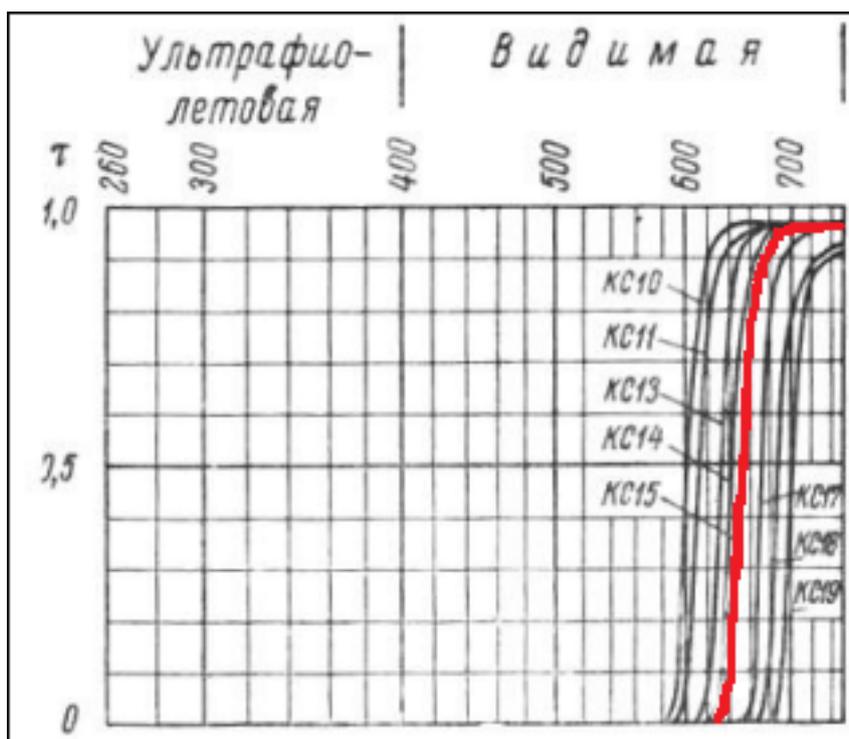


Рис. 21: Спектральная характеристика пропускания фильтра

Применение фильтра позволяет использовать для перехода к бинарному изображению как поиск по цвету, так и по яркости. В дальнейшем для упрощения работы используется фильтрация по яркости пикселей из красного канала изображения. На рисунке 22 показан пример изображения с использованием оптического фильтра.



Рис. 22: Кадр без использования фильтра (слева) и кадр с использованием оптического фильтра (справа)

2.4 Преобразование линии на изображении

Следующим шагом бинаризации изображения является фильтрация шумов, и обработка полученного пятна лазера для повышения гладкости контура. Данная операция проводится при помощи морфологических операций открытия и расширения с прямоугольными ядрами 3×3 и 5×5 (рис. 23).



Рис. 23: Изображение после использования бинаризации и морфологических операций

Поскольку длина деформированной линии больше длины исчезнувшего сегмента прямой линии лазера, то периметр искомого пятна должен

быть больше периметра исчезнувшего сегмента. На основе этого можно отфильтровать необходимый контур. Чтобы явно выделить контур деформированной лазерной линии, сравниваются бинаризованные обрабатываемый кадр и кадр, на котором линия не деформирована. При помощи логической операции "Исключающее ИЛИ" на обрабатываемом кадре убираются все пиксели не деформированной части лазерной линии.

Применение логической операции "И" на полученном изображении и изображении с не деформированной линией позволяет получить контур, соответствующий исчезнувшему сегменту прямой линии на обрабатываемом кадре. Чтобы получить пятно от искривленного лазера необходимо применить операцию "И" на обрабатываемый кадр и кадр после операции "Исключающее ИЛИ" и выбрать контур, периметр и площадь которого больше периметра и площади отсутствующего сегмента прямой. На рисунке 24 показан пример произведенных операций.

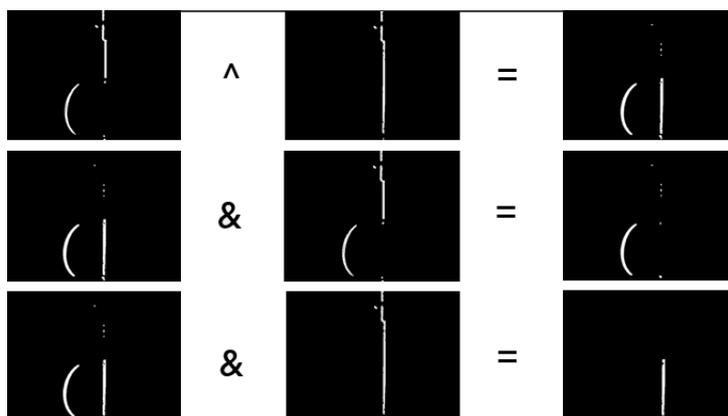


Рис. 24: Логические операции

Для дальнейшего упрощения работы вместо всего изображения обрабатываются только минимальные прямоугольные области вокруг выбранных контуров, являющиеся регионами интереса. Последующие преобразования производятся только в рамках данных регионов.

Так как контур на изображении имеет площадь, то для дальнейшей обработки его необходимо представить как кривую толщиной в один пик-

сель. Такой переход необходим для уменьшения количества точек объекта, а также для повышения точности измерения поперечного сечения объекта. Для этого к полученному региону интереса контура применяется скелетизация. Результат применения скелетизации можно увидеть на рисунке 25. Скелетизация проводится по алгоритму Зонга-Суена.

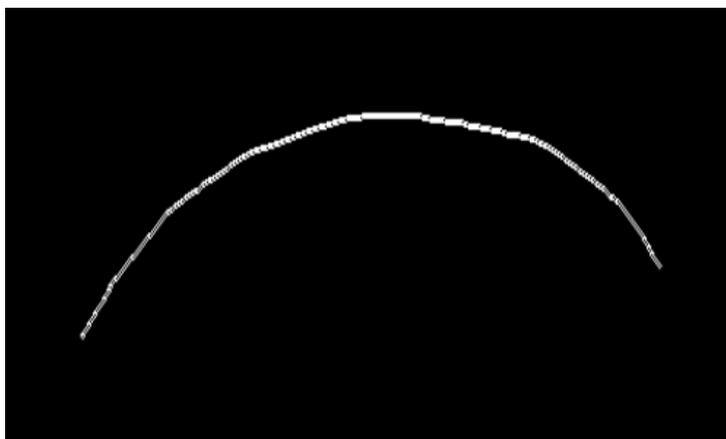


Рис. 25: Изображение после скелетизации

В полученной кривой может находиться несколько сотен точек. Такое количество точек является излишним, поэтому для уменьшения детализации необходимо пренебречь некоторыми точками, сохранив общую форму объекта. Для такого прореживания данных с сохранением общей формы используется алгоритм Дугласа-Пекера. Кривая после прореживания точек представлена на рисунке 26.

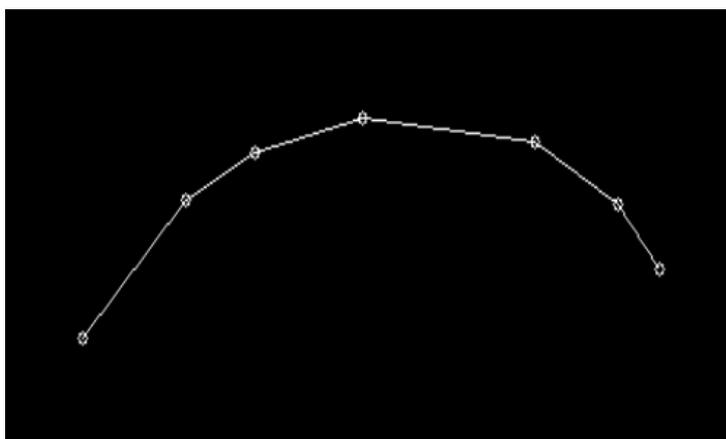


Рис. 26: Кривая на изображении после прореживания точек

2.5 Получение и соединение данных с нескольких камер

Для обработки данных с нескольких камер, создаётся несколько процессов, запускаемых на разных ядрах процессора. Каждый процесс получает изображение, обрабатывает и отправляет данные в главный процесс для создания облака точек. Упрощенные кривые накапливаются до тех пор, пока лазерная линия деформирована. После окончания объекта кривые переводятся из пикселей в миллиметры. Схема работы потоков изображена на рисунке 27.

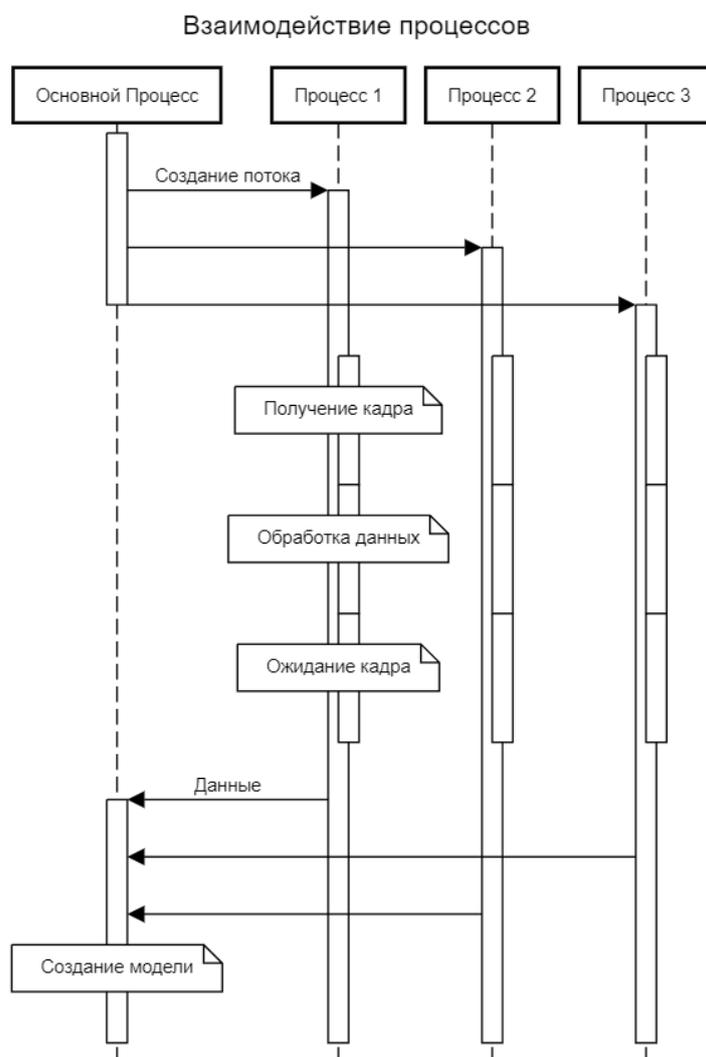


Рис. 27: Схема взаимодействия процессов

Чтобы соединить данные с различных камер необходимо перенести координаты всех точек в единую систему координат. За основную систему координат принимается система координат, связанная с центром плоскости экрана главной камеры, установленной над сканируемым объектом. Преимуществом такой системы координат является то, что она является симметричной относительно боковых камер.

Преобразование систем координат происходит в следующем порядке:

- Производится перенос системы координат данных с основной камеры и боковых на расстояние, соответствующее половине стороны изображения вдоль лазерной линии.
- Системы координат, связанные с боковыми камерами, поворачиваются на угол наклона относительно нормали земли.

$$x' = x \cdot \cos \alpha + y \cdot \sin \alpha$$

$$y' = y \cdot \cos \alpha - x \cdot \sin \alpha$$

,где x - ось, направленная вдоль лазерной линии, y - ось высоты сканируемого сечения, α - угол наклона камеры

- Системы координат смещаются вдоль на высоту подвеса по одной оси и на расстояние от главной камеры до экрана соответствующей системы координат по другой оси.

На рисунке 28 показана схема переноса побочных систем координат в основную.

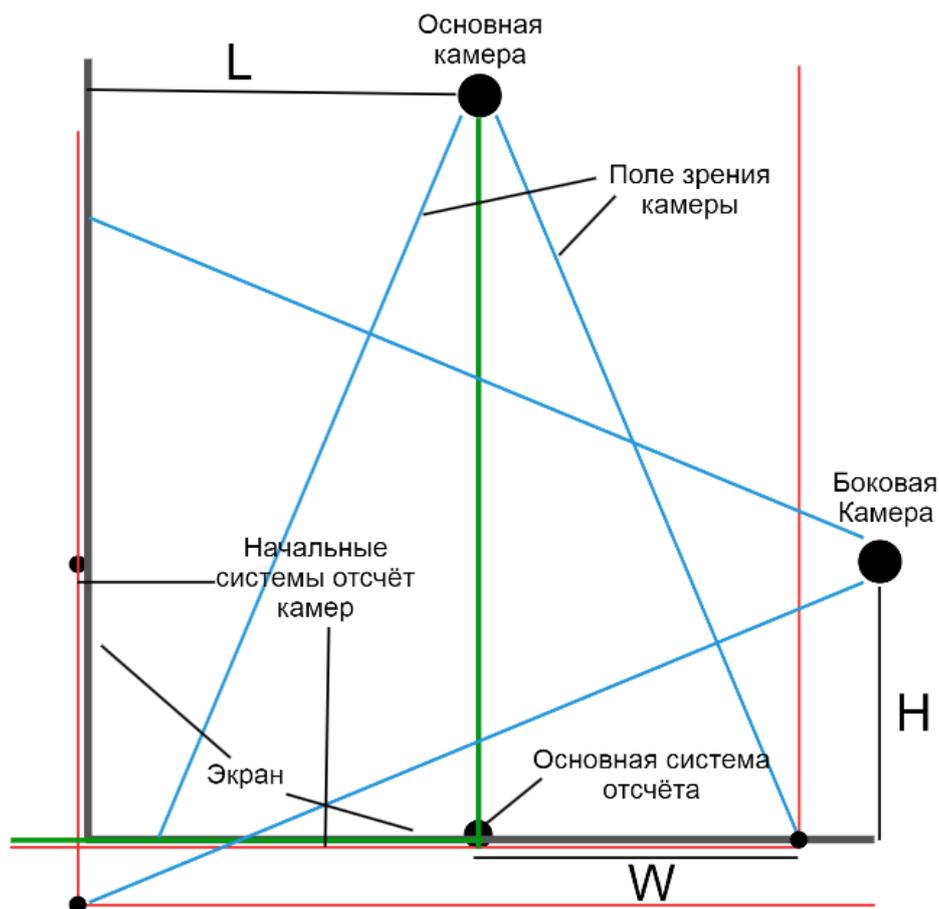


Рис. 28: Преобразования систем координат

Здесь большими черными кругами обозначены камеры, используемые в системе. Синими линиями показана область зрения камер. Серыми жирными линиями обозначены экраны, на которые проецируются лазерные линии. Зелеными линиями обозначена основная система отсчёта, к которой приводятся все остальные системы отсчёта, обозначенные красным цветом. Для синхронизации данных с камер необходимо измерить 2 параметра системы для каждой подключенной камеры: L - расстояние от основной камеры до экрана соответствующей боковой камеры, H - высоту подвеса боковой камеры. Параметр W зависит от разрешения камеры.

3 Тестовые измерения

3.1 Создание 3D модели

Первым методом, используемым для построения модели, является триангуляция Делоне. Пример полученной модели с применением триангуляции Делоне для формирования граней моделей из облака точек можно увидеть на рисунке 29.

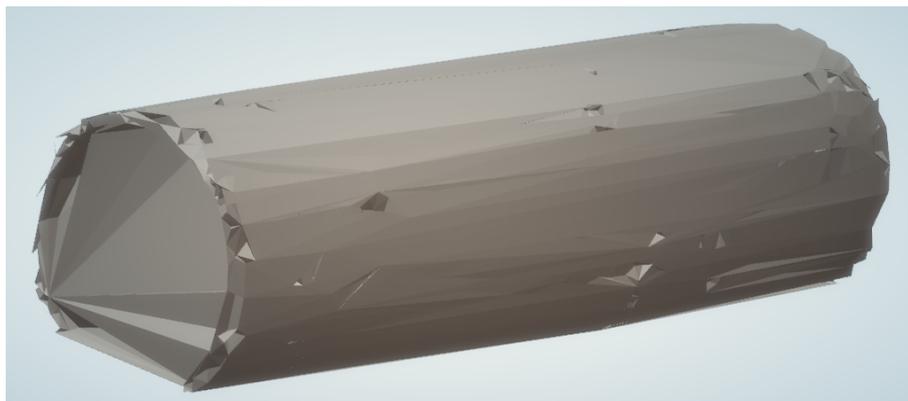


Рис. 29: Модель, построенная с помощью триангуляции Делоне

Модель имеет неровности. Эти неровности связаны с автоматическим построением граней методом триангуляции Делоне. Так как некоторые точки лежат слишком близко друг к другу относительно остальных точек, это может привести к созданию неоптимальных треугольников.

Модель, полученную с помощью метода выпуклой оболочки для формирования граней моделей из облака точек, можно увидеть на рисунке 30.

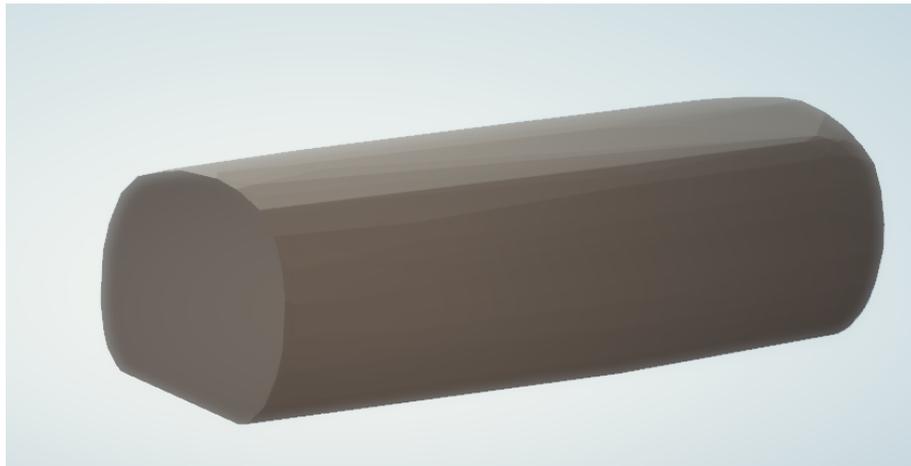


Рис. 30: Модель, построенная с помощью метода построения выпуклой оболочки

Модель не имеет неровностей связанных с дефектами алгоритмов. Так как тестовый объект не имеет сложной вогнутой формы, то данный метод для него является оптимальным.

3.2 Оценка параметров сканера

Для оценки точности был проведен эксперимент с измерением поперечного сечения объекта при разных высотах. На рисунке 31 показан график абсолютного отклонения, выраженного в процентах от высоты. Измерения проводились для угла 30 градусов, высоте подвеса камеры и лазера 60 см, расстоянии между камерой и лазером 35 см и камерой с углом обзора 110 градусов при разрешении 1280 x 960 пикселей.

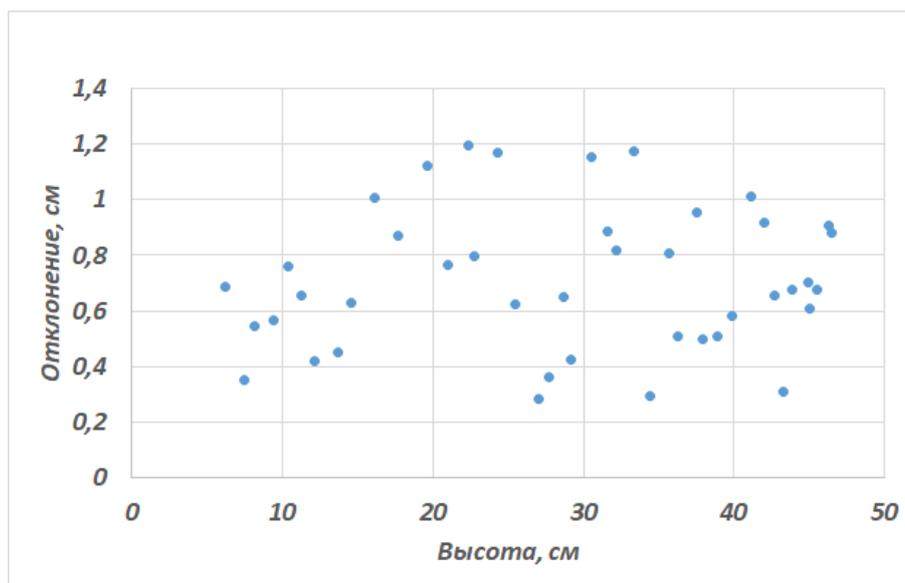


Рис. 31: Зависимость отклонения от высоты измеряемого объекта

Видно, что отклонения остаются на постоянном уровне на протяжении всего диапазона измерений. Отклонения не превышают 1.3 см, что является приемлемым результатом.

Средняя скорость обработки составляет 20 измерений в секунду. Измеряемый диапазон составляет от 5 до 45 процентов от высоты подвеса при отклонениях меньше одного сантиметра.

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработан и реализован алгоритм получения трёхмерных размеров объекта по изображению. Для упрощения работы с несколькими камерами, работа с камерами ведётся на разных ядрах процессора.
2. Оптимальной конструкцией сканера является вариант, при котором камера находится вертикально, а лазер под углом. Оптимальными параметрами являются: угол 30 градусов для лазера и расстояние между камерой и лазером, при котором центр изображения находится над лазерной линией.
3. Для уменьшения помех и упрощения обработки изображений целесообразно использовать оптический фильтр КС-15.
4. Для построения визуальной 3D-модели целесообразно использовать метод выпуклой оболочки.

Список литературы

- [1] ГОСТ 52117-2003 Лесоматериалы круглые. Методы измерения // Введ. 01.01.2003.— М.: Издательство стандартов,— 2003.— 47 с.
- [2] Рутковский, В.О. Метод получения трехмерных цифровых моделей технических объектов, основанный на применении искусственных текстур / В.О. Рутковский, М.А. Рутковская// *Сибирский аэрокосмический журнал*.— 2010.— № 5. — С. 249–254.
- [3] Rochini, C. A low cost 3D scanner based on structured light / С. Rochini, Р. Cigoni, С. Montani// *Eurographics*.— 2001.— Vol.20.— № 3. — Р. 1–10.
- [4] Иванов, П.В. Области применения систем машинного зрения / П.В. Иванов, А.В. Бойков // *Записки Горного института*.— 2011.— № 192. — С. 190–191.
- [5] Гарсия, Г. Обработка изображений с помощью OpenCV — ДМК Пресс. — 2016. 212 с.
- [6] Гонсалес, Р. Вудс, Р. Цифровая обработка изображений" / Р. Гонсалес, Р. Вудс — Москва : Техносфера — 2012. 1104 с.
- [7] Datasheet Raspberry Pi 4 Model B.[Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>
- [8] Raspberry Pi High Quality Camera.[Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://datasheets.raspberrypi.com/hq-camera/hq-camera-product-brief.pdf>
- [9] Бушенко, Д.А. Технология построения алгоритмов утоньшения для скелетизации протяженных объектов / Д.А.. Бушенко, Р.Х. Садыхов // *Доклады БГУИР*.— 2009.— № 47. — С. 81–86.

- [10] *Рейер, И.А.* Методы анализа формы изображений на основе непрерывного гранично-скелетного представления // *дис. ... к.т.н.*— 05.13.11.— Москва.— И.А. Рейер — 2004.
- [11] *Прохоров, И.С.* Анализ проблем адаптации алгоритмов упрощения ломаных на мобильных устройствах (на территории г. Петрозаводска) // *Магистерская диссертация.*— 01.04.02.— Петрозаводский государственный университет.— И.С. Прохоров — 2009.
- [12] *Сырых, А.С.* Сравнительный анализ алгоритмов реконструкции поверхности из облака точек / А.С. Сырых, С.Н. Медведев // *Международный научно-исследовательский журнал.*— 2023.— № 12. —
- [13] Калибровка камеры с использованием OpenCV.[Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://waksoft.susu.ru/2020/02/29/kalibrovka-kamery-s-ispolzovaniem-s-opencv/>
- [14] ГОСТ 9411-91 Стекло оптическое цветное. Технические условия // Введ. 01.01.1993.— М.: Издательство стандартов,— 1992.— 48 с.
- [15] ГОСТ 9411-91 Стекло оптическое цветное. Технические условия // Введ. 01.01.1993.— М.: Издательство стандартов,— 1992.— 48 с.