

# Оглавление

<b>Введение</b>	3
<b>Глава 1. ОБЗОР АНАЛОГОВ</b>	6
<b>Глава 2. ВЫБОР ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СКАНЕРА</b>	11
2.1. Выбор метода сканирования	11
2.2. Выбор компоновки	13
<b>Глава 3. ВЫВОД НЕОБХОДИМЫХ УРАВНЕНИЙ</b>	17
3.1. Конфигурации модели	17
3.1.1. Условные обозначения	18
3.1.2. Модель в системе координат принтера	18
3.1.3. Модель в системе координат камеры	22
3.1.4. Выбор модели	26
3.2. Оценка дискретности	26
3.3. Калибровка сканера	29
<b>Глава 4. АЛГОРИТМ МОДУЛЯ СКАНИРОВАНИЯ</b>	32
4.1. Этапы работы алгоритма	32
4.2. Блок обработки видео	33
4.2.1. Предобработка	34
4.2.2. Выделение лазера	35
4.2.3. Привязка координат	40
4.3. Блок поиска объектов	41
4.4. Блок обработки dxf	42
4.5. Блок генерации gcode	42
<b>Глава 5. ОПИСАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ</b>	43

<b>Заключение</b> . . . . .	44
<b>Список литературы</b> . . . . .	45

## Введение

В настоящее время существует множество задач, требующих бесконтактного метода измерений: ориентирование в пространстве, измерение объектов, реконструкция объектов, сбор биометрических данных, реверс-инжиниринг, а также дизайн и творчество. Подобных задач с каждым годом становится всё больше, и таким образом растёт важность 3D-сканирования и следовательно необходимость эффективных алгоритмов, решающих конкретную задачу. Кроме того, некоторые задачи требуют уникальных встроенных решений, что представляет собой как правило ещё и конструкторскую задачу.

Одним из конкретных применений такой технологии является фигурное нанесение глазури на различные кондитерские изделия. На данный момент такая операция как правило выполняется вручную, что означает высокую стоимость, длительное производство и низкую повторяемость. Автоматизация этого процесса происходит обычно на крупных предприятиях, где производят большие партии однотипных кондитерских изделий.

Относительно недавно стали появляться автоматизированные комплексы для нанесения рисунков на различные кондитерские изделия, однако они всё равно ограничены конкретными видами изделий (например, плоские крекеры). Такие комплексы работают по принципу 3D-принтера или ЧПУ-станка. Они печатают в одной плоскости, не имея возможности наносить материал с учётом отклонений формы, не говоря уже об изделиях сложной формы, таких как овсяное печенье, кексы, торты и т.д., у которых форма в общем случае не только не плоская, но и обладает множеством искривлений, выпуклостей и впадин. Данное обстоятельство мешает автоматизации нанесения произвольных рисунков на произвольные изделия.

Данная работа посвящена разработке модуля 3D-сканирования для кондитерского принтера, что позволит наносить рисунки на произвольные изделия. Разработка основывается на базе прототипа системы автоматического фигурно-

го нанесения пищевой пасты в который модуль необходимо встроить. Прототип представляет из себя принтер закрытого типа с подвижным печатающим узлом и статичным столом, на котором располагаются кондитерские изделия.

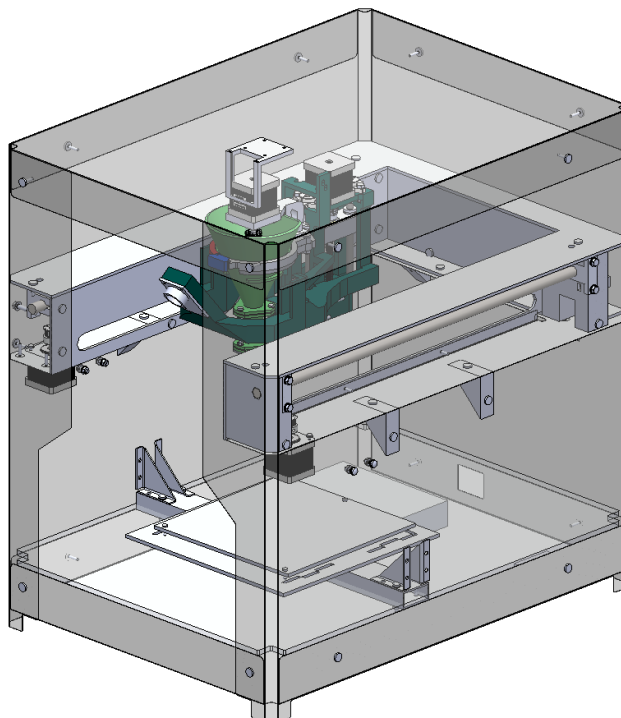


Рисунок 1 – Прототип системы автоматического фигурного нанесения пищевой пасты

В направлении технического зрения для прототипа уже была проделана некоторая работа, однако, как показала практика, этого было недостаточно в виду чего потребовалась разработка нового модуля и соответствующего алгоритма для его работы.

Алгоритм должен решать следующие задачи:

- получение облака точек рабочей зоны
- обнаружение объектов и их положений в облаке точек
- генерация gcode произвольного рисунка с учётом облака точек

Новый модуль должен удовлетворять следующим требованиям:

- рабочая зона 200 × 200 мм

- точность  $\pm 0.5$  мм
- время обработки данных не более 30 секунд
- минимальная стоимость

## Глава 1

## ОБЗОР АНАЛОГОВ

Как уже было отмечено ранее, 3D-сканеры находят применение во множестве областей и решают самые разные задачи. Поэтому на данный момент уже есть готовые устройства, позволяющие производить сканирование, и реализовано несколько методов сканирования, каждый из которых требует разные компоненты и ресурсы. Рассмотрим существующие аналоги таких устройств и соответствующие им методы. Ограничим выбор 3D-сканерами распространяющиеся по open-source модели, поскольку в нашем проекте важна низкая стоимость модуля.

Определим критерии для сравнения устройств:

Описать в каких единицах бывают параметры

Точность — насколько результаты измерения отклоняются от реальных. Один из наиболее важных параметров сканеров. В зависимости от метода колеблется от единиц миллиметров до микрометров.

Скорость — насколько быстро производятся вычисления. Многие задачи требуют расчётов в реальном времени и этот критерий является критическим. Как правило Высокая скорость обработки сказывается на точности алгоритма или ограничивает применимость системы (универсальность), поскольку использует специфичные упрощения и аппроксимации.

Диапазон измерений — диапазон расстояний (глубины) на которую рассчитано устройство для обеспечения заданной точности. Как правило определяется физическими ограничениями метода и конструкцией. Например размеры матрицы камеры и угол обзора задают верхний порог измерений, а для методов основанных на регистрации импульсов света существует нижний предел измерений обусловленный высокой скоростью света.

Габариты — в зависимости от используемой технологии получаютс

личные габариты и конфигурации. В настоящее время существуют ручные сканеры довольно малых размеров, но также есть и “настольные”, более габаритные устройства.

**Мобильные приложения** В настоящее время 3D-технологии довольно распространены, поэтому существуют приложения на смартфон (например, Sony 3D Creator), которые позволяют проводить сканирование любому человеку при наличии девайса поддерживающего необходимые технологии. Такие приложения как правило распространяются бесплатно, что делает её денежно самой выгодной (не считая стоимости смартфона).

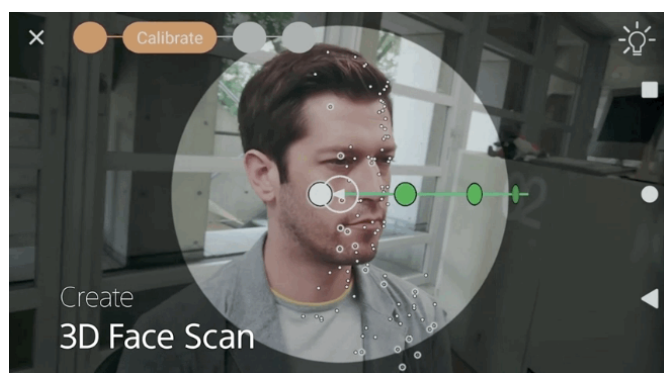


Рисунок 1.1 – Окно приложения Sony 3D creator

Эти приложения используют метод фотограмметрии для расчётов. Суть данного метода заключается в том, что, имея несколько изображений одного объекта с разных точек обзора, можно сопоставить особые точки (features) этих изображений после чего восстановить модель объекта по каждому пикселю снимков[1].

Метод фотограмметрии, стереоскопия в частности, как правило имеет сравнительно низкую точность, но высокую скорость сканирования. Особенно низкая точность свойственна мобильным приложениям в виду ограниченных вычислительных ресурсов и качества используемых камер. Измерять таким методом можно объекты на расстоянии порядка метра от точки обзора. Габариты и стоимость ограничены используемым смартфоном, однако этот же метод можно

использовать с несколькими фиксированными камерами.

Таблица 1.1 – Характеристики приложения Sony 3D creator

Метод	Фотограмметрия\стереозрение
Диапазон	$\approx 1$ м
Скорость	По завершению съёмки
Точность	$\approx 1$ мм
Габариты	Корпус смартфона
Стоимость	Бесплатно (стоимость смартфона)

**BQ Ciclop DIY 3D Scanner** Это сканер с открытым исходным кодом, предоставляет доступ к 3D-моделям для самостоятельной печати. Представляет из себя поворотную платформу с закреплёнными к ней веб-камере и двумя лазерными модулями. Данное устройство использует метод лазерной триангуляции для расчёта координат в сцене.



Рисунок 1.2 – Сканер BQ Ciclop

Суть этого метода в том, что лазер излучает на исследуемую поверхность, которую снимает камера. Камера и лазер при этом должны находиться под углом друг к другу. Таким образом проекция лазера, видимая в кадре, искажается согласно форме исследуемой поверхности. Зная угол и расстояние между камерой и лазером, а так же фокусное расстояние, можно рассчитать координаты засвеченных точек используя отклонение проекции в кадре, так как эти



величины формируют подобные треугольники с одной неизвестной величиной – координатой точки.

Данный метод, как правило, обладает высокой точностью. В дорогих сканерах (например, Faro ScanArm) точность может быть в пределах микрометров. Но сканирование этим методом может занять некоторое время, т.к. возможно исследовать только один "профиль" сцены за кадр. Таким образом необходимо провести лазером от одного конца сцены до другого, при этом плотность облака напрямую зависит от частоты кадров камеры и скорости движения вдоль сцены.

Недостатками этого аналога являются его конструкция с поворотным столиком, которую невозможно внедрить в систему. Также нельзя использовать его код, т.к. он написан с учётом конструкции сканера.

Таблица 1.2 – Характеристики сканера BQ Ciclop 3D Scanner

Метод	Лазерная триангуляция
Диапазон	Ø250 × 205 мм
Скорость	2-8 минут на оборот
Точность	≈ 0.5 мм
Габариты	500 × 300 × 230 мм
Стоимость	6 000 р.

**hesamh DIY 3D Scanner** Данный аналог это открытый проект за авторством пользователя hesamh основанный на методе структурированного света. Сканер собран из старого проектора и двух веб-камер, закреплённых на деревянном основании. Для этого проекта в открытом доступе находится инструкция для самостоятельной сборки и он использует свободное программное обеспечение 3DUNDERWORLD для обработки данных.

Метод структурированного света похож на лазерную триангуляцию (триангуляция с проекцией линией является частным случаем), но использует специ-

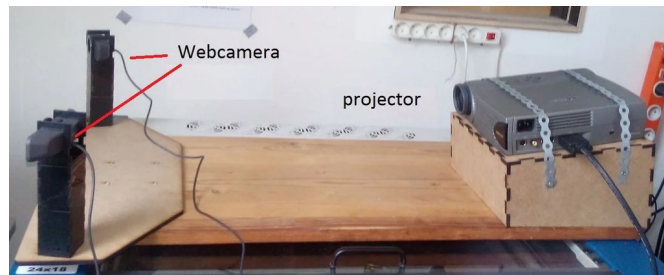


Рисунок 1.3 – Сканер hesamh

альный рисунок (паттерн), как правило чередующихся чёрных и белых полос. Этот рисунок также проецируется на объект, с помощью проектора, и искажения рисунка соответствуют форме объекта. Данный метод обладает в общем случае такой же точностью как метод лазерной триангуляции, но позволяет получить больше информации из одного кадра. Однако при этом необходим более сложный алгоритм для обработки данных с камеры. Другим существенным недостатком этого метода является необходимость использовать проектор, что значительно увеличивает его габариты и стоимость по сравнению с другими методами.

Таблица 1.3 – Характеристики сканера от hesamh

Метод	Структурированный свет
Диапазон	до 2 м от камеры
Скорость	-
Точность	$\approx 0.5$ мм
Габариты	$1000 \times 500 \times 300$ мм
Стоимость	$\sim 10000$ р.

## Глава 2

# ВЫБОР ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СКАНЕРА

В результате обзора аналогов стало ясно, что использовать готовые решения для нашей системы невозможно. Таким образом необходимо разработать собственный модуль совместимый с прототипом. Для этого требуется с учётом особенностей принтера выбрать подходящий метод сканирования, компоновку модуля и составляющие модуля.

### 2.1. Выбор метода сканирования

Для выбора метода сканирования необходимо выделить условия работы и ограничения накладываемые существующей конструкцией на модуль и сопоставить их с требованиями и особенностями методов, а также учесть требования технического задания.

Поскольку все методы оптические, они предъявляют требования к освещению окружения. Оно не должно быть неравномерным, не должно быть слишком ярким и должно быть без бликов. При этом сканируемые поверхности не должны быть зеркальными или поглощающими свет.

Параметры конструкции принтера:

- габариты принтера  $400 \times 550 \times 560$  мм
- размеры стола  $200 \times 200$  мм
- контролируемое освещение
- закрытый корпус

Видно, что свободное пространство в принтере ограничено, особенно учитывая наличие подвижного печатающего узла, габариты которого выходят за пределы рабочей зоны. Таким образом становится невозможно использование крупных компонентов в нашем модуле, даже если они стационарные.

Поэтому метод структурированного света в данном случае не подходит, так как требует использование проектора, которые имеют большие размеры и не дешёвы. Существуют и миниатюрные проекторы, однако их цены ещё выше. Помимо этого алгоритмы для расчёта координат по этому методу довольно сложны.

Лазерная триангуляция накладывает дополнительные ограничения на возможные сканируемые поверхности, так как использует видимое излучение для работы. Это значит, что сканирование в свете предметов такого-же цвета, что и свет излучаемый лазером, будет сильно затруднено. Такая ситуация может возникнуть, если изделие, например торт, будет обладать цветным покрытием. Однако это можно преодолеть если использовать сканирование в темноте. Это позволит сканировать такие объекты, тем не менее качество таких сканов будет хуже из-за явления самозасветки лазера. Так же, используя этот метод, модуль, целиком или только лазер, необходимо перемещать вдоль сцены, чтобы захватить все профили исследуемой поверхности. Это снизит скорость сканирования в сравнении с остальными методами. Однако для реализации этого метода достаточно одной камеры и лазерного модуля. Это позволяет компактно расположить элементы, так как они не занимают много места. Так же это позволяет не тратить больших средств, что важно в данном проекте.

Метод фотограмметрии или стереозрения в данной работе не рассматривается, так как этот метод был опробован ранее и не показал удовлетворительных результатов. В данном методе теряется большое количество данных сцены и точность оставляет желать лучшего. При этом для этого необходимы две камеры, что так же проблематично встроить в существующую систему[2].

## 2.2. Выбор компоновки

Общий план модуля сканирования представлен на рисунке 2.1 (подвижный узел не показан). Он демонстрирует относительное расположение элементов в пространстве. В данной компоновке лазер направлен перпендикулярно столу (параллельно оси  $Z$ ), линия проекции параллельна оси  $Y$  стола, а камера под углом к вертикали – вокруг оси  $Y$  системы координат стола – не имея поворота относительно остальных осей. При этом из-за особенностей конструкции камера получается расположена «вверх-ногами». Движение модуля происходит параллельно оси  $X$  системы координат принтера в сторону уменьшения координаты.

убрать подпись в углу картинки

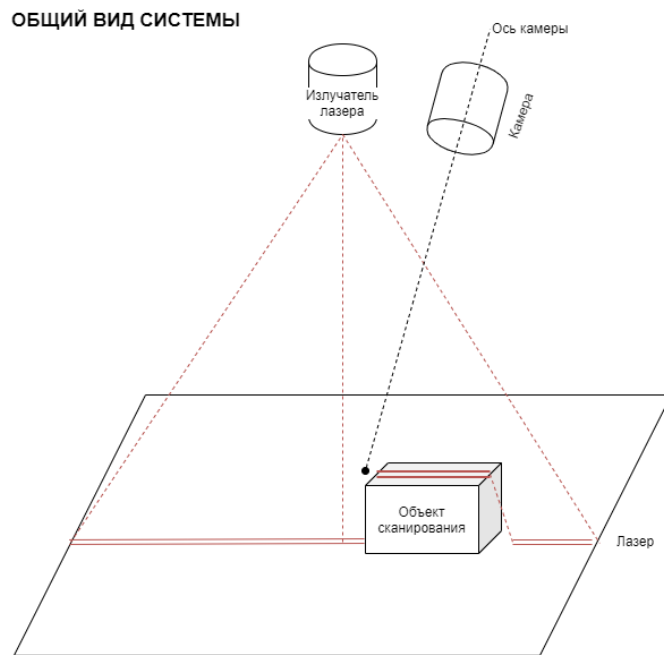


Рисунок 2.1 – Общий план модуля

Для обеспечения лучших показателей точности необходимо выбрать расстояние и угол между оптической осью камеры и осью лазера, а так же расстояние от камеры до стола. Этот этап важен, так как от этих параметров зависит разрешающая способность сканера и видимая рабочая зона. Чем ниже камера к столу, тем меньше дискретизация значений координат, но одновременно мень-

ше видимая область. Угол наклона камеры также влияет на дискретизацию и видимую область сканера. С помощью расчётов приведённых в разделе 3.2 были установлены следующие величины этих размеров:

Таблица 2.1 – Основные размеры модуля сканирования

Высота над столом	$150 \pm 10$ мм
Расстояние от камеры до лазера	$150 \pm 10$ мм
Угол между осями камеры и лазера	$30 - 45^\circ$

Данные величины позволяют достичь необходимой по ТЗ точности в  $\pm 0.5$  мм и ширины обзора 200 мм. Для модуля используется камера Microsoft Lifecam Cinema с максимальным разрешением  $1080 \times 720$  и максимальной частотой 30 кадров в секунду. Использование данной камеры позволяет упростить процесс калибровки, так как она обладает встроенной ректификацией изображения. Лазерный модуль S-2S с толщиной проецируемой линии в 3 мм. Толщина линии лазера также влияет на точность измерений и в общем случае чем тоньше, тем лучше.

Камера устанавливается в специальный держатель изготовленный по технологии 3D-печати, в котором предусмотрена калибровка поворота камеры для более точного направления на интересующую зону и надёжного закрепления. Реализация крепления и установки модуля в систему рассматривается в работе [ссылка на мацуганова](#).

К конструкции модуля предъявляются следующие требования:

- минимизация влияния вибрации на положение камеры
- размеры в пределах указанных в таблице 2.1
- минимизация видимой части препятствий
- допускаются препятствия в верхней половине кадра занимающие не более четверти высоты кадра

- возможность калибровки поворота камеры
- возможность калибровки поворота лазера

Итоговый вид модуля в составе системы изображён на рисунке 2.3. Крепление камеры изображена на рисунке 2.4.

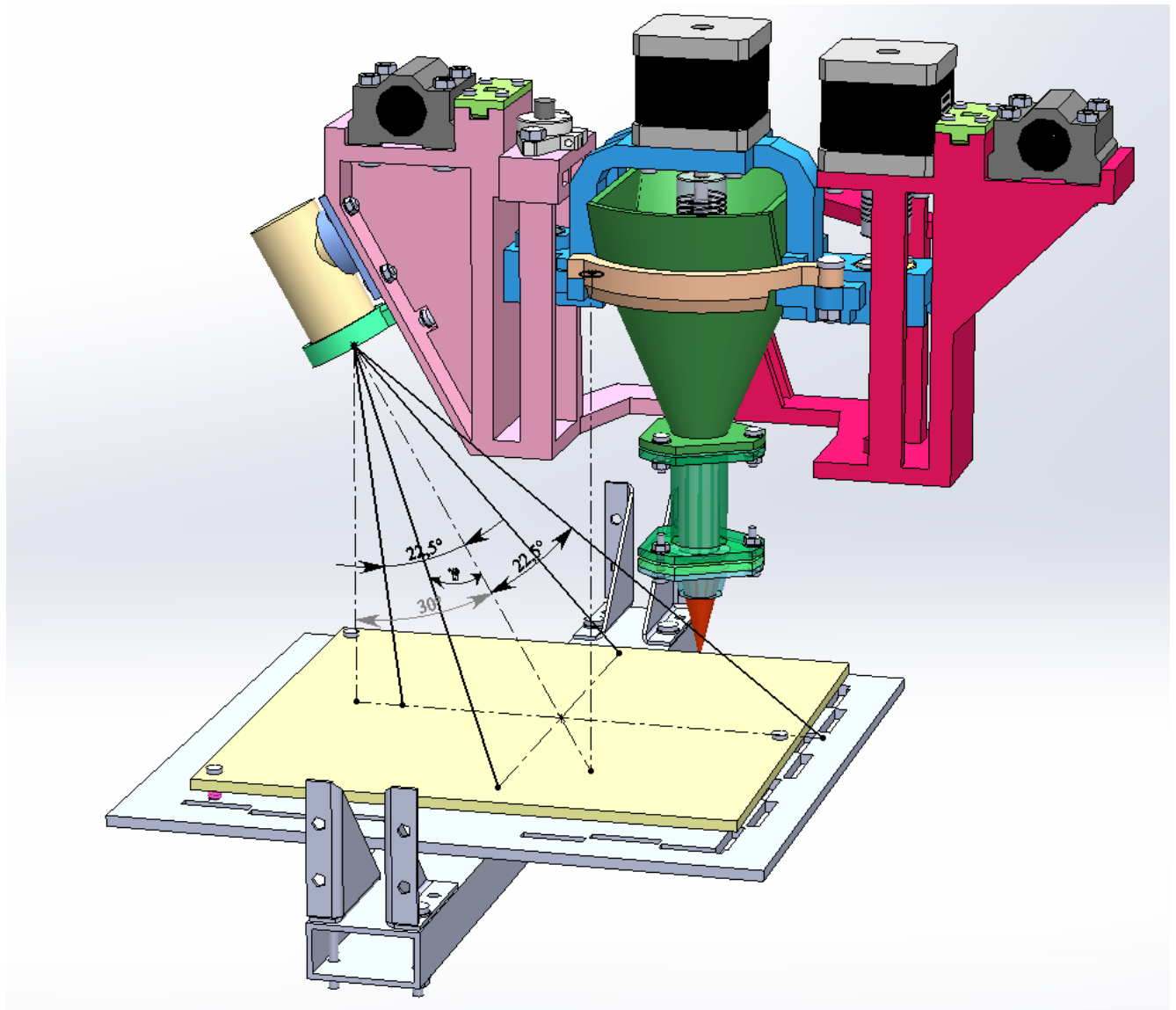


Рисунок 2.2 – Общий вид в принтере

СДЕЛАТЬ НОРМ СКРИН

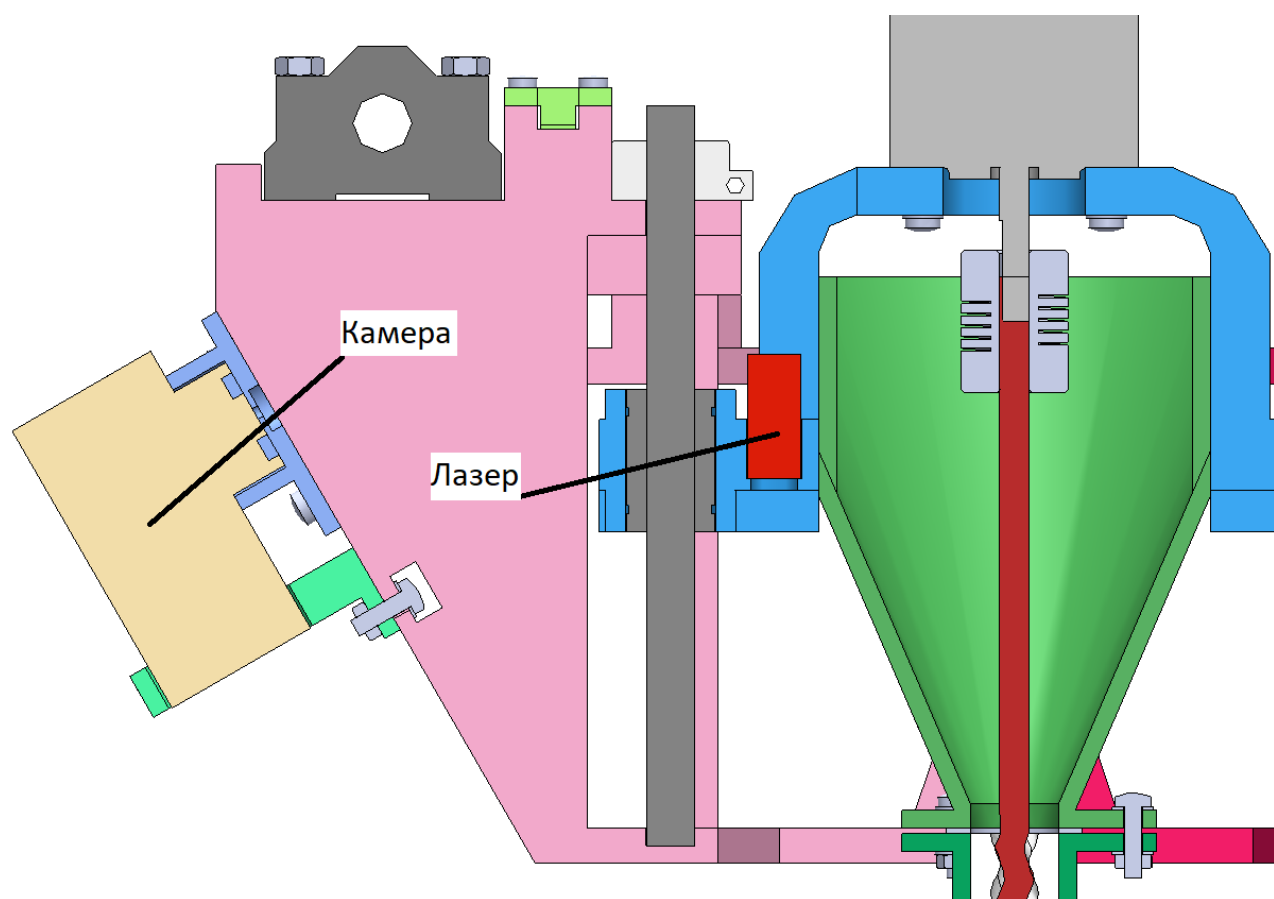


Рисунок 2.3 – Финальная компоновка модуля сканирования

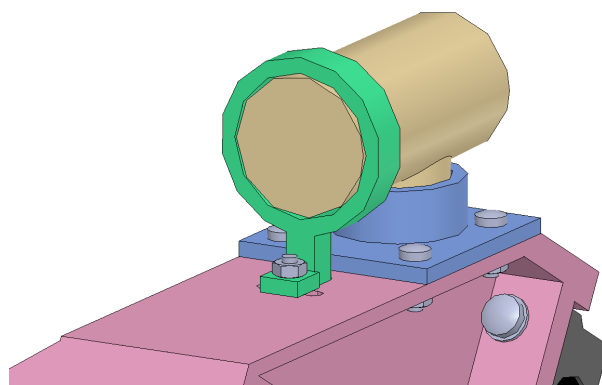


Рисунок 2.4 – Крепление камеры



# ВЫВОД НЕОБХОДИМЫХ УРАВНЕНИЙ

## 3.1. Конфигурации модели

Для написания алгоритма сканирования в первую очередь необходимо составить математическую модель сканера, то есть вывести соответствующие уравнения, по которым будут рассчитываться координаты точек в сцене. При этом возможно несколько вариантов для вывода необходимых уравнений.

Для расчёта камера представляется пинхол-моделью (pinhole camera model), в которой отверстие соответствует диафрагме и является центром проекции, а экран соответствует получаемому изображению. Начало координат в данной модели располагается в центре проекций – точке где пересекаются линии проекций точек пространства.

Оси координат направлены следующим образом –  $Z$  от камеры перпендикулярно плоскости изображения,  $Y$  вниз параллельно короткой стороне кадра,  $X$  вправо параллельно длинной стороне. Таким образом получаем правую систему координат.

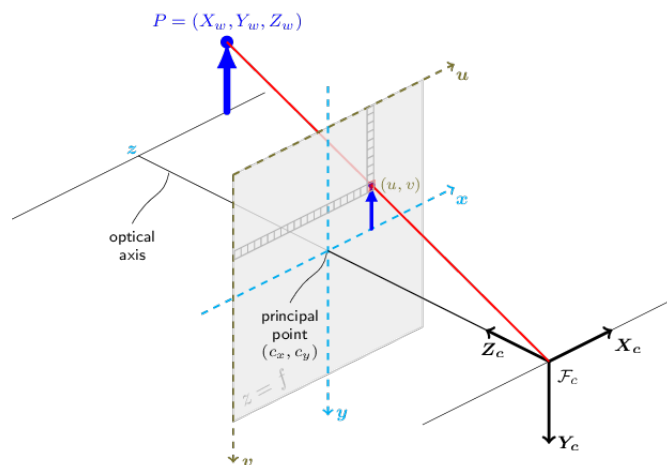


Рисунок 3.1 – Пинхол модель камеры; principal point — центр изображения, проекция начала координат на плоскость изображения

Экран в данной модели может располагаться как между объектом и центром проекции (как показано на рисунке 3.1), так и за центром проекции. В последнем случае изображение оказывается перевёрнутым.

### 3.1.1. Условные обозначения

$f$  — фокусное расстояние камеры в пиксельной мере

$u, v$  — горизонтальная и вертикальная координаты соответственно в плоскости изображения (пиксели)  $u_0, v_0$  — координата центра изображения

### 3.1.2. Модель в системе координат принтера

Первый расчёт производится в системе координат принтера. Эта модель основывается на реальных размерах сборки и отражает реальную конструкцию модуля. В данном варианте предполагается, что стол — рабочая поверхность — находится в плоскости  $XU$ , лазер излучает перпендикулярно столу и камера имеет поворот только вокруг оси  $Y$ . При этом считается, что лазер не имеет поворота вокруг своей оси.

Похожий метод расчёта используется в работе Machine vision system for curved surface inspection[3].

Необходимо найти уравнения описывающие зависимость координат  $(x_P, y_P, z_P)$  точки  $P$  от координат проекции этой точки на плоскость изображения  $(u_P, v_P)$ . Из  $\triangle PP'M$  видно, что

$$z_P = \frac{P'M}{\cos \angle PP'M} \quad (3.1)$$

где  $\alpha$  — угол поворота камеры вокруг оси  $Y$ . Далее из  $\triangle CP'M$  очевидно

$$P'M = CP' \sin(\beta - \beta_0) \quad (3.2)$$

где  $\beta$  — произвольный угол падения луча лазера на матрицу,  $\beta_0$  — угол падения луча лазера отражённого от поверхности стола на матрицу. Рассмотрим  $\triangle CP'C'$



тогда координата  $x_P$  выражается следующим соотношением

$$x_P = x_K - D = x_K - H \operatorname{tg}(\alpha + \beta_0) \quad (3.8)$$

Для вывода уравнения координаты  $y_P$  необходимо рассмотреть модуль в проекции на плоскость  $ZY$

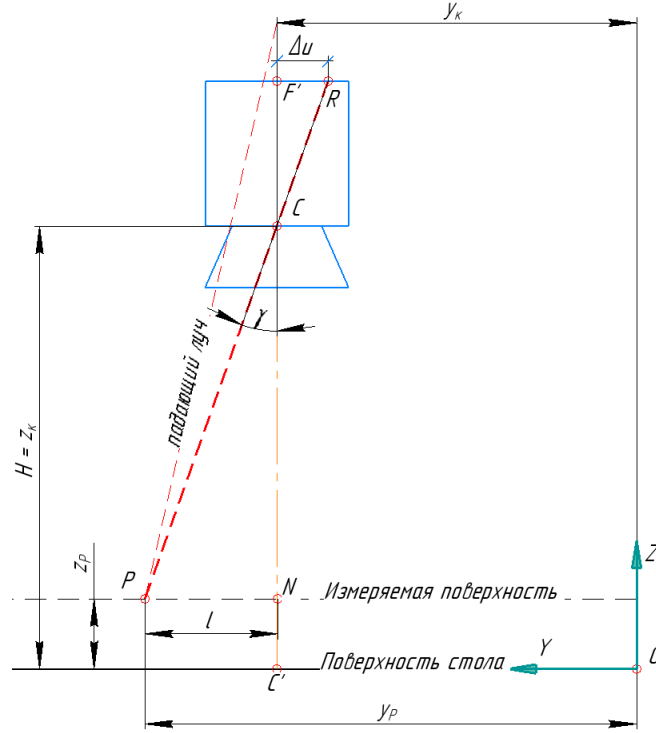


Рисунок 3.3 – Чертёж в проекции на плоскость  $ZY$

При выводе важно помнить, что данный вид – проекция. Из чертежа очевидно, что

$$y_P = y_K + l \quad (3.9)$$

Из  $\triangle CPN$  легко вывести  $l$

$$l = CN \operatorname{tg} \gamma \quad (3.10)$$

где  $\gamma$  – угол падения луча лазера на матрицу в данной проекции. Поскольку  $CN = H - z_P$  можно записать

$$y_P = y_K + (H - z_P) \operatorname{tg} \gamma \quad (3.11)$$

Для вывода углов падения  $\beta$  и  $\beta_0$  рассмотрим  $\triangle CSF$  и  $\triangle CTF$ . Очевидно, что

$$\begin{aligned}\operatorname{tg} \beta &= \frac{\Delta v}{f} \\ \operatorname{tg} \beta_0 &= \frac{\Delta v_0}{f}\end{aligned}\tag{3.12}$$

где  $\Delta v = v_P - v_0$  – расстояние в пикселях от точки падения луча лазера на матрицу до центра изображения,  $\Delta v_0 = v_{P0} - v_0$  – аналогичное расстояние для луча лазера, отражённого от поверхности стола.

Рассмотрев  $\triangle CF'R$  получим значение угла падения в проекции  $ZY$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\Delta u}{CF'} = \frac{\Delta u}{f \cos \alpha}\tag{3.13}$$

где  $CF' = f \cos \alpha$  – проекция фокусного расстояния на плоскость  $ZY$ . Из полученных равенств легко найти значения углов, поскольку величины  $\Delta u$  и  $\Delta v$  известны из изображения с камеры.

Таким образом приходим к следующим уравнениям

$$\begin{cases} x_P = x_K - H \operatorname{tg} (\alpha + \beta_0) \\ y_P = y_K + (H - z_P) \frac{\Delta u}{f \cos \alpha} \\ z_P = H \frac{\sin (\beta - \beta_0)}{\cos (\alpha + \beta_0) \sin (\alpha + \beta)} \end{cases}\tag{3.14}$$

Преимущества этой модели:

- $H$  можно измерять напрямую
- рассчитанные значения координат сразу в системе координат принтера
- отражает реальную конструкцию сканера
- координата  $x$  константа относительно камеры

Недостатки:

- много тригонометрических преобразований

- при изменении высоты камеры необходимы новые замеры
- большое количество допущений, как следствие много возможностей для ошибок

### 3.1.3. Модель в системе координат камеры

Второй расчёт делается в системе координат связанной с камерой. Эта модель основывается на теоретических величинах и расчёт координат происходит в два этапа. Первый – расчёт координат относительно камеры, второй – преобразование в систему координат принтера. В этой модели считается, что лазер не имеет поворота вокруг своей оси, все остальные компоненты могут располагаться произвольно.

Для преобразования между двумя системами координат необходимо знать матрицу поворота системы камеры относительно системы принтера. С помощью пакета `opencv` можно полностью определить положение камеры в пространстве используя шахматный паттерн.

Введём следующие определения:

*Рабочая плоскость* — плоскость перпендикулярная оптической оси камеры и проходящая через точку пересечения оптической оси камеры и луча лазера

*Измеряемая плоскость* — плоскость, до которой измеряется расстояние

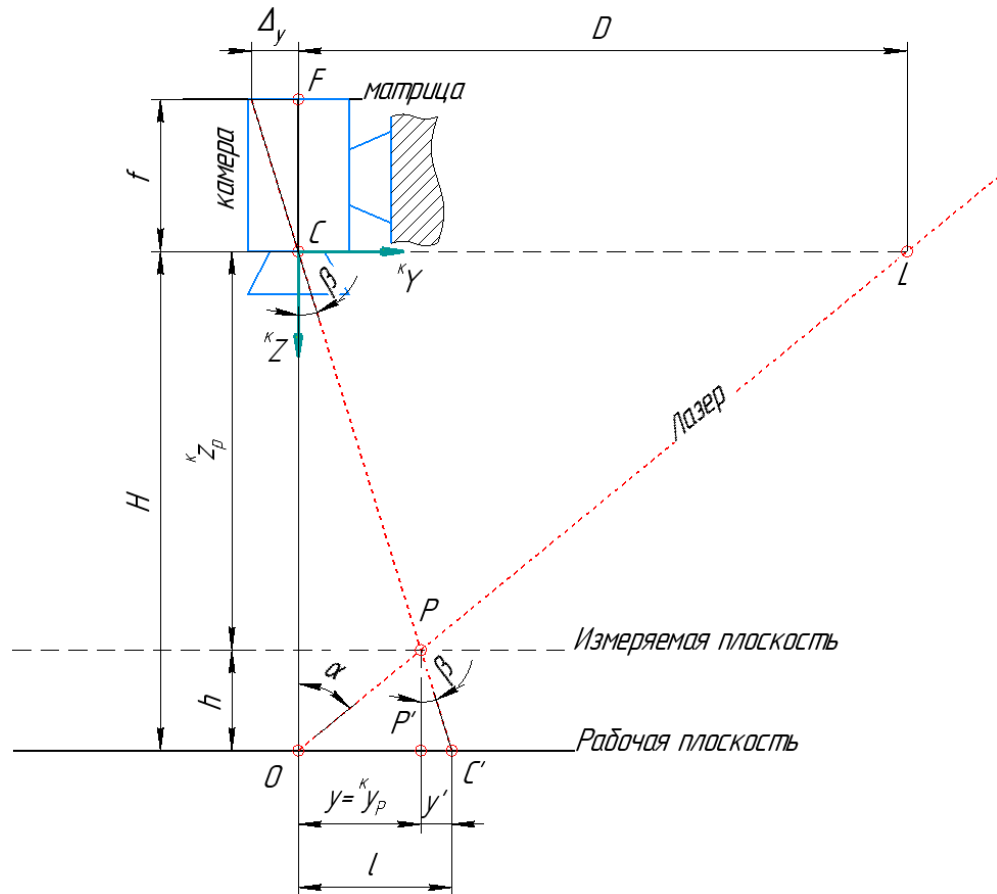


Рисунок 3.4 – Чертёж поясняющий вычисления;  $O$  — точка пересечения оптической оси камеры и луча лазера (плоскости свечения лазера);  $C$  — оптический центр камеры, начало координат СК камеры;  $P$  — точка пересечения луча лазера и измеряемой плоскости;  $P'$  — проекция точки  $P$  на рабочую плоскость;  $h$  — высота измеряемой плоскости над рабочей плоскостью;  $l_x, l_y$  — кажущиеся координаты измеряемой точки;  $x, y$  — реальные координаты измеряемой точки;  $x', y'$  — разность кажущейся и реальной координаты измеряемой точки

**ИСПРАВИТЬ ЧЕРТЁЖ**

На рисунке 3.4 обозначены следующие размеры:

$H$  — рабочая высота, расстояние от оптического центра камеры до рабочей плоскости.

$\alpha$  — угол между осями камеры и лазера.

Необходимо найти уравнения описывающие зависимость координат ( ${}^Kx_P, {}^Ky_P, {}^Kz_P$ ) точки  $P$  в системе координат камеры от координат проекции

этой точки на плоскость изображения  $(u_P, v_P)$ . Из чертежа очевидно, что

$${}^{\kappa}z_P = H - h, \quad (3.15)$$

где  $h$  – высота измеряемой плоскости над рабочей. Рассмотрим треугольники  $\triangle OPC$ ,  $\triangle OPP'$ ,  $\triangle PCP'$ . Видно что

$$l_y = y + y', \quad (3.16)$$

где  $l_y$  – кажущаяся координата точки  $P$ ,  $y = {}^{\kappa}y_P$  – реальная координата точки  $P$ ,  $y'$  – разность реальной и кажущейся координаты. Так как  $PP' = h$  можно записать следующее:

$$\begin{aligned} y &= h \operatorname{tg} \alpha \\ y' &= h \operatorname{tg} \beta \end{aligned} \quad (3.17)$$

где  $\beta$  – угол при вершине  $P$  в треугольнике  $\triangle PCP'$ ,  $\alpha$  – угол между оптической осью камеры и осью лазера. Также из треугольника  $\triangle COS'$  ясно

$$l = H \operatorname{tg} \beta \quad (3.18)$$

следовательно

$$H \operatorname{tg} \beta = h (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta) \quad (3.19)$$

Зная, что  $h = H - {}^{\kappa}z_P$  получаем

$${}^{\kappa}z_P = H \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta} \quad (3.20)$$

Из треугольника  $\triangle CF$  **НЕТ БУКВЫ** находим

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta v}{f}, \quad (3.21)$$

где  $\Delta v = v_P - v_0$ ,  $f$  – фокусное расстояние камеры. В итоге получаем

$${}^{\kappa}z_P = H \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha + \frac{\Delta v}{f}} \quad (3.22)$$

Далее из  $\triangle C$  **НЕТ БУКВЫ**  $P$  очевидно, что

$${}^{\kappa}y_P = {}^{\kappa}z_P \operatorname{tg} \beta = H \frac{\operatorname{tg} \alpha \frac{\Delta v}{f}}{\operatorname{tg} \alpha + \frac{\Delta v}{f}} \quad (3.23)$$



аналогично для  ${}^{\kappa}x_P$

$${}^{\kappa}x_P = {}^{\kappa}z_P \operatorname{tg} \gamma = H \frac{\operatorname{tg} \alpha \frac{\Delta u}{f}}{\operatorname{tg} \alpha + \frac{\Delta v}{f}} \quad (3.24)$$

где  $\operatorname{tg} \gamma = \frac{\Delta u}{f}$  – угол падения луча лазера на матрицу в плоскости  $XZ$ ,  $\Delta u = u_P - u_0$ .

В результате для системы координат камеры получаем:

$$\begin{cases} {}^{\kappa}x_P = H \frac{\operatorname{tg} \alpha \frac{\Delta u}{f}}{\operatorname{tg} \alpha + \frac{\Delta v}{f}} \\ {}^{\kappa}y_P = H \frac{\operatorname{tg} \alpha \frac{\Delta v}{f}}{\operatorname{tg} \alpha + \frac{\Delta v}{f}} \\ {}^{\kappa}z_P = H \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha + \frac{\Delta v}{f}} \end{cases} \quad (3.25)$$

Для перевода в систему координат принтера:

$$\begin{pmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} {}^{\kappa}x_P \\ {}^{\kappa}y_P \\ {}^{\kappa}z_P \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{\kappa} \\ y_{\kappa} \\ z_{\kappa} \end{pmatrix} \quad (3.26)$$

Преимущества модели:

- отсутствие тригонометрии в расчётах координат
- параметры  $H$  и  $\alpha$  фиксированы
- меньшее количество допущений

Недостатки модели:

- сложно прямо измерить  $H$  и  $\alpha$ , необходим теоретический расчёт
- необходима матрица поворота камеры

В этом методе главными параметрами являются высота камеры над рабочей плоскостью и угол между камерой и лазером, но они рассчитываются теоретически и не совпадают с аналогичными из предыдущего метода.

### 3.1.4. Выбор модели

Сравнивая модели мы видим, недостатки второй модели менее серьёзны чем первой, а также что вторая модель не имеет недостатков первой модели. В частности расчёт в системе координат камеры упрощает эксплуатацию модуля, т.к. отсутствует необходимость повторных измерений параметров при изменении положения внешних по отношению к модулю элементов (например, перемещение стола). Также меньшее количество допущений для второй модели позволяет добиться более точных результатов не имеющих пространственных искажений (например, растяжение сцены), которые могут возникать в следствии дополнительного неучтенного наклона камеры. Таким образом более выгодным вариантом расчёта является вторая модель.

Использование этой модели требует дополнительных предварительных расчётов, для использования, а именно – расчёт положения камеры относительно системы координат принтера и расчёт параметров модуля  $H$  и  $\alpha$ . Расчёт положения камеры – матрицы поворота  $R$  и координат  $(x_k, y_k, z_k)$  – можно произвести средствами библиотеки `opencv` используя специальный шахматный паттерн (подробнее в главе 4). Для расчёта параметров модуля необходимо вывести соответствующий расчёт на основе уравнений 3.25 3.26, что делается в разделе 3.3.

## 3.2. Оценка дискретности

Для удовлетворения характеристик заданных по ТЗ необходимо выбрать подходящие значения параметров  $H$  и  $\alpha$ . Эти параметры определяют разрешающую способность сканера и ширину обзора камеры. Разрешающая способность камеры – разность определяемых высот между соседними пикселями.

Для простоты примем, что рабочая плоскость совпадает со столом и лазер излучает перпендикулярно столу. Таким образом  $\alpha$  становится углом наклона камеры от вертикали. Для данной оценки и последующего применения резуль-

татов для конструкции  $H$  – высота камеры над столом. Также, поскольку основным изделием является печенье, нас в первую очередь интересует диапазон высот объектов 5-20 мм.

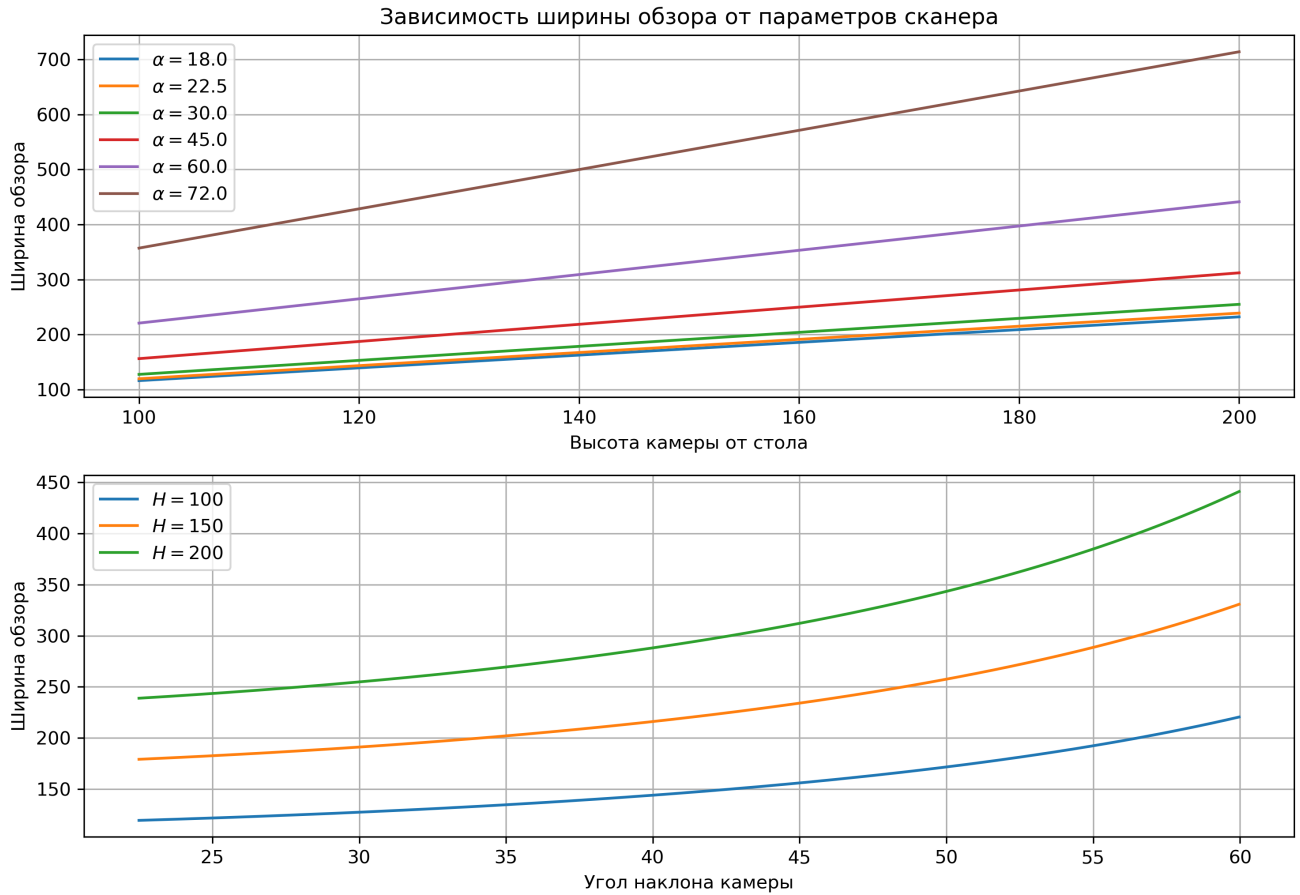


Рисунок 3.5 – Зависимость ширины обзора камеры от параметров сканера

Сначала рассмотрим рисунок 3.5 на котором изображена зависимость ширины обзора при разных параметрах сканера. На графике линии показывают ширину обзора по центру кадра, так как мы предполагаем, что рабочая плоскость располагается в плоскости стола. Видно, что чем больше высота над столом  $H$  и угол от вертикали  $\alpha$ , тем больше ширина обзора. Необходимая ширина обзора по ТЗ равна 200 мм. Этот рисунок поможет выбрать оптимальное значение при исследовании графиков изображённых на следующем рисунке 3.6.

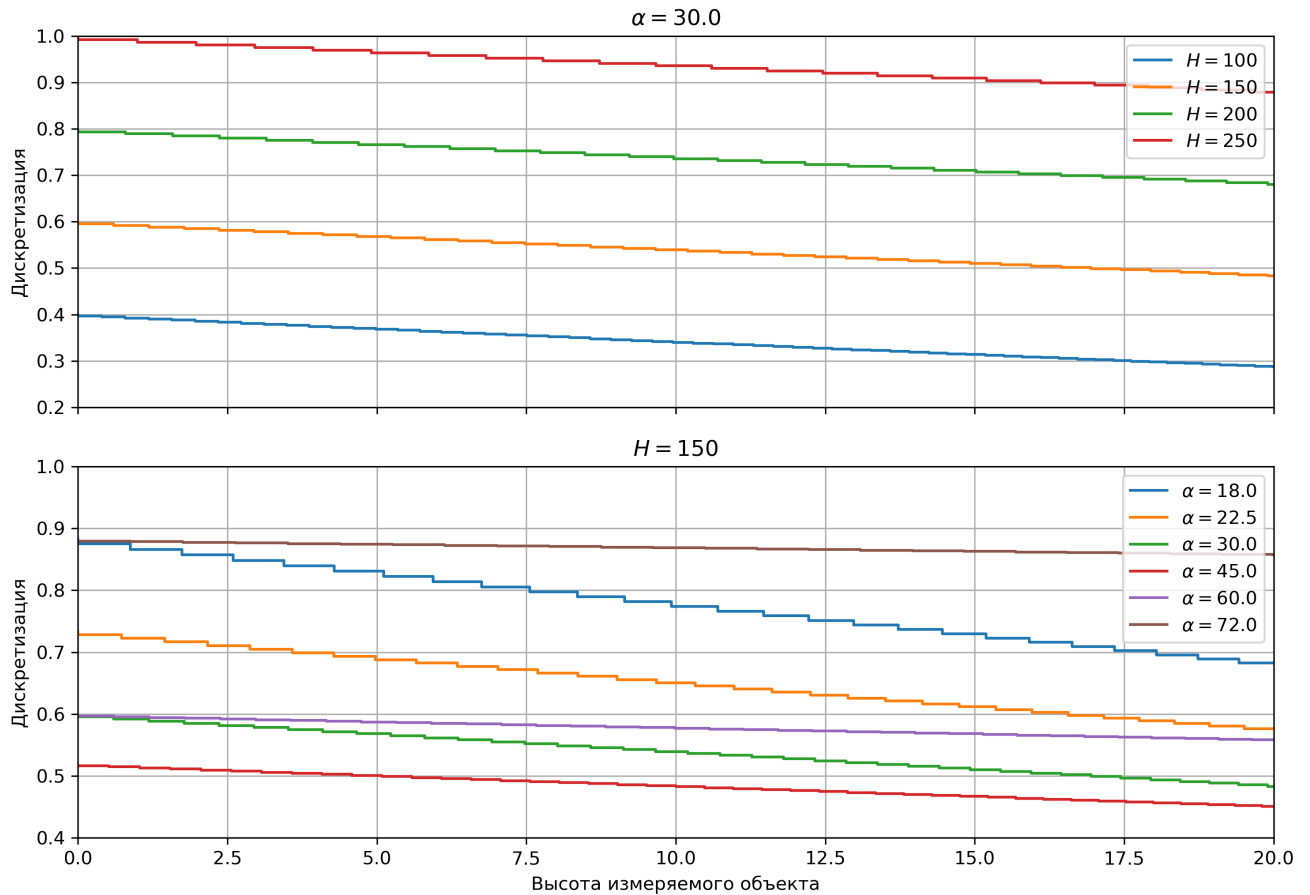


Рисунок 3.6 – Зависимость дискретизации от параметров сканера

По графикам на рисунке 3.6 видно, что дискретизация растёт с увеличением высоты камеры над столом, что логично т.к. при этом на один пиксель приходится большее расстояние. От угла же дискретизация зависит иначе - чем дальше угол от  $45^\circ$ , тем она больше. По ТЗ указана точность  $\pm 0.5$  мм, таким образом дискретность должна быть не больше этого значения. Видно, что наиболее выгодные значения параметров лежат в интервалах  $130 \text{ мм} \leq H \leq 150 \text{ мм}$ ;  $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ . При параметрах из данного диапазона одновременно достигается заданная точность и ширина обзора. При этом здесь рассматривается случай, когда лазер на изображении находится с точностью до пикселя, однако итоговый модуль использует алгоритм нахождения лазера с субпиксельной точностью, что ещё больше снижает дискретизацию и позволяет компенсировать ошибки возникающие при сборке модуля или невозможности использовать идеальные параметры.

### 3.3. Калибровка сканера

Для калибровки сканера – расчёта параметров  $H$  и  $\alpha$  – необходимо вывести уравнения, в которых используя известные высоты эталонов можно рассчитать искомые величины. Для этого воспользуемся уравнением координаты  ${}^K z_P$  из 3.25

$${}^K z_P = H \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha + \frac{\Delta v}{f}} \quad (3.27)$$

Имея два таких уравнения для разных высот  ${}^K z_i$  и  ${}^K z_k$  и соответствующих им разностей пикселей  $\Delta v_i$  и  $\Delta v_k$  получаем следующую систему уравнений

$$\begin{cases} {}^K z_i = H \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha + \frac{\Delta v_i}{f}} \\ {}^K z_k = H \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha + \frac{\Delta v_k}{f}} \end{cases} \quad (3.28)$$

разделив  ${}^K z_i$  на  ${}^K z_k$  получаем уравнение с одной неизвестной  $\operatorname{tg} \alpha$

$$\frac{{}^K z_i}{{}^K z_k} = \frac{\operatorname{tg} \alpha + \frac{\Delta v_k}{f}}{\operatorname{tg} \alpha + \frac{\Delta v_i}{f}} \quad (3.29)$$

проделав небольшие преобразования приходим к окончательному уравнению для  $\operatorname{tg} \alpha$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{{}^K z_k \frac{\Delta v_k}{f} - {}^K z_i \frac{\Delta v_i}{f}}{{}^K z_i - {}^K z_k} \quad (3.30)$$

Конкретное значение угла в данном случае неважно поскольку в расчётах используется именно  $\operatorname{tg} \alpha$ , поэтому можно оставить так. Подставляя полученное равенство в любое уравнение в системе после преобразований получаем уравнение для  $H$

$$H = {}^K z_i {}^K z_k \frac{\Delta v_k - \Delta v_i}{{}^K z_k \Delta v_k - {}^K z_i \Delta v_i} \quad (3.31)$$

Таким образом получаем систему уравнений, позволяющую рассчитать параметры сканера зная координаты двух точек  ${}^K z_i$  и  ${}^K z_k$  в системе камеры и соот-

ветствующих им разностей координат в плоскости изображения.

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \alpha = \frac{{}^K z_k \frac{\Delta v_k}{f} - {}^K z_i \frac{\Delta v_i}{f}}{{}^K z_i - {}^K z_k} \\ H = {}^K z_i {}^K z_k \frac{\Delta v_k - \Delta v_i}{{}^K z_k \Delta v_k - {}^K z_i \Delta v_i} \end{cases} \quad (3.32)$$

Или можно переписать данную систему через углы падения луча лазера на матрицу  $\beta$  и получить следующую систему

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \alpha = \frac{{}^K z_k \operatorname{tg} \beta_k - {}^K z_i \operatorname{tg} \beta_i}{{}^K z_i - {}^K z_k} \\ H = {}^K z_i {}^K z_k \frac{\operatorname{tg} \beta_k - \operatorname{tg} \beta_i}{{}^K z_k \operatorname{tg} \beta_k - {}^K z_i \operatorname{tg} \beta_i} \end{cases} \quad (3.33)$$

Однако полученная система уравнений зависит от координат в системе камеры, которые сложно измерить на практике. Необходимо привести уравнения к использованию координат из системы принтера. Данные координаты гораздо легче получить, т.к. возможно произвести прямые измерения этих величин. Для перевода координат из системы камеры в систему принтера воспользуемся уравнением 3.26. Согласно данному уравнению координата  $z_P$  точки  $P$  в системе принтера выражается следующим образом

$$z_P = r_{31} {}^K x_P + r_{32} {}^K y_P + r_{33} {}^K z_P + z_K \quad (3.34)$$

подставляя сюда уравнения 3.24 и 3.23 получаем

$$z_P = r_{31} {}^K z_P \operatorname{tg} \gamma + r_{32} {}^K z_P \operatorname{tg} \beta + r_{33} {}^K z_P + z_K \quad (3.35)$$

соответственно  ${}^K z_P$  равняется

$${}^K z_P = \frac{z_P - z_K}{r_{31} \operatorname{tg} \gamma + r_{32} \operatorname{tg} \beta + r_{33}} \quad (3.36)$$

Таким образом для калибровки необходимо выполнить следующее

1. Измерить координату  $z$  минимум пары эталонов в системе принтера
2. Для каждого эталона определить  $\Delta v$  или  $\operatorname{tg} \beta$

3. Перевести координаты в систему камеры подставив в уравнение [3.36](#)
4. Подставить полученные координаты и соответствующие углы в уравнение [3.32](#) или [3.33](#)

Для лучшей точности рекомендуется выбирать пары эталонов с наибольшей разницей в высоте, а также проводить множество расчётов с различными парами эталонов для усреднения результатов и минимизации ошибки измерений.

## Глава 4

**АЛГОРИТМ МОДУЛЯ СКАНИРОВАНИЯ****4.1. Этапы работы алгоритма**

Задача алгоритма заключается в преобразовании входных данных – видео процесса сканирования и dxf файла с заданным контуром – в gcode файл. Gcode файл это последовательность инструкций для принтера написанных особым образом. Файл формата dxf это векторное изображение некоторого произвольного рисунка, которое необходимо нанести на изделия в сцене. В целом алгоритм модуля состоит из четырёх операций:

1. Обработка видео/Получение облака точек
2. Поиск объектов в облаке
3. Подготовка dxf файла
4. Генерация gcode файла

Последовательность операций отражена в блок-схеме на рисунке 4.1. При запуске алгоритма на вход передаются видео со сканера и dxf файл, а также загружаются дополнительные данные индивидуальные для принтера (конфиги, на схеме не показано). После этого запускаются этапы обработки видео и dxf файла. Эти этапы независимы и могут выполняться параллельно. Этап обработки видео включает в себя предобработку каждого кадра, затем выделение лазера в кадре, расчёт координат по формулам из главы 3. Результатом этого этапа является облако точек сцены. Оно передаётся в следующий блок для поиска объектов. Цель этого этапа в получении положений и ориентаций объектов в сцене. Затем данные об объектах и подготовленный рисунок передаются в последний блок алгоритма, где из них генерируется файл инструкций для



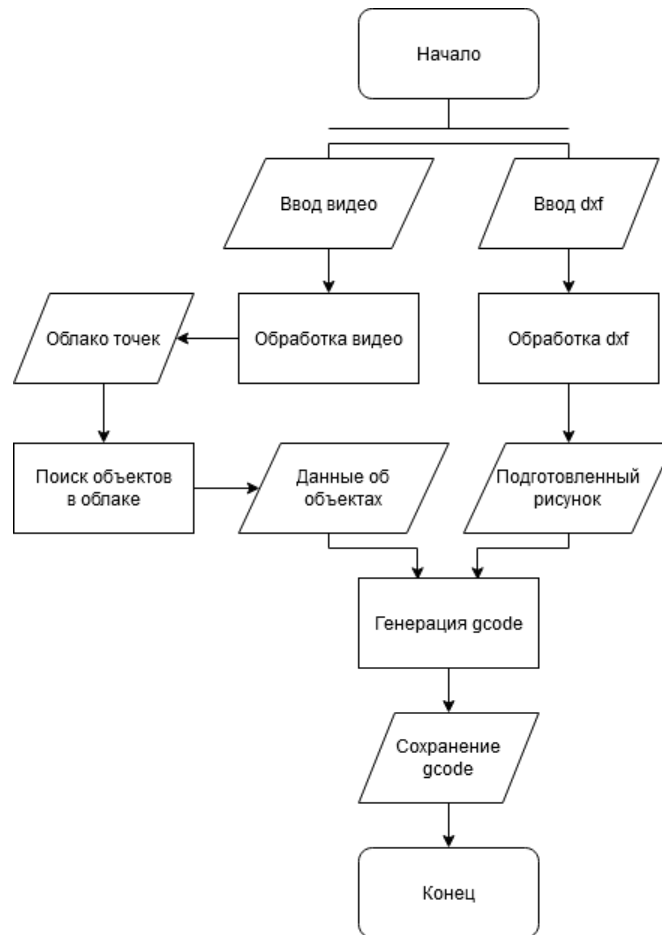


Рисунок 4.1 – Обобщённая блок схема алгоритма модуля

принтера которые задают последовательность печати рисунка из dxf файла на каждый найденный объект в сцене.

## 4.2. Блок обработки видео

Как уже было сказано, блок обработки видео включает в себя следующие шаги, которые выполняются для каждого кадра видео:

1. Предобработка кадра
2. Выделение лазера
3. Расчёт координат

После этого облако точек сохраняется в памяти и производится привязка координат к системе принтера. Этот этап необходим, потому что в виду аппаратных ограничений сканирование в общем случае начинается в произвольном месте до рабочей поверхности и получить точную координату не представляется возможным. Поэтому данная задача решается программными средствами. Результатом работы алгоритма становится облако точек, представляющее из себя матрицу размерностью (*количество кадров*  $\times$  *ширина кадра*) где в каждой ячейке записана координата соответствующая этой точке. Таким образом облако точек одновременно является картой глубины сцены.

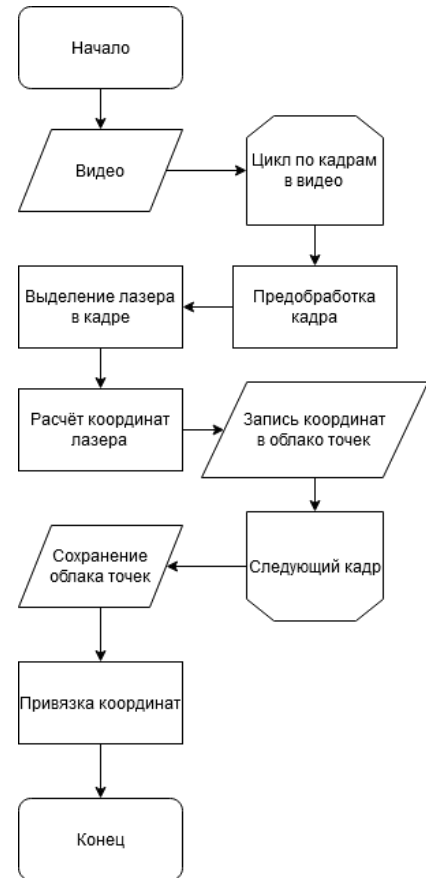


Рисунок 4.2 – Обобщённая блок-схема обработки видео

#### 4.2.1. Предобработка

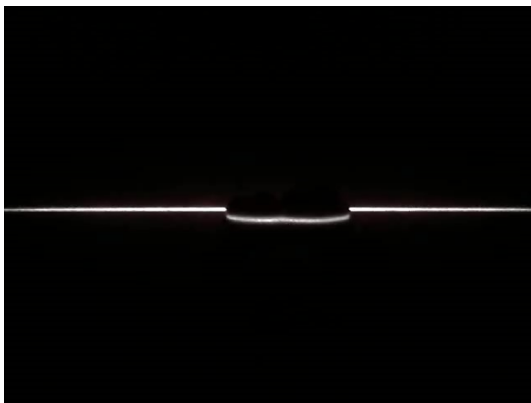


Рисунок 4.3 – Пример кадра из видео

Перед тем как выделить на изображении лазер, необходимо провести предобработку, которая сгладит шумы в кадре и убереёт большинство лишней информации. Первым шагом необходимо обрезать видео по заранее установленной области интереса. Вне этой области заранее гарантировано отсутствие полезной информации, т.е. вне этой области нет рабочей зоны.

Затем к изображению применяется фильтр гаусса **пояснение что это?**, что размывает картинку. Это делается с целью «размешать» шум имеющийся на изображениях и сгладить резкие переходы, что поможет на следующем шаге.

После этого с полученного изображения снимается «маска» – то есть изображение бинаризируется. В таком изображении единицами обозначена область, которую мы хотим оставить, а нулями область, которую мы хотим отбросить. Для получения маски предусмотрено два подхода на выбор – бинаризация по заданному пороговому значению и бинаризация с порогом по Оцу. Последняя хороша тем, что позволяет избежать необходимость ручного подбора порогового значения.

Метод Оцу применим к изображениям на гистограмме которых есть только два пика. Хорошее пороговое значение для таких изображений находится между этими двумя пиками[4].

Это идеально подходит для нашего случая. Такая маска единицами помечит области на изображении, в которых с наибольшей вероятностью находится лазер, а нулями области, где лазера почти наверняка нет.

Последним шагом является применение маски к обрезанному изображению, что представляет собой простое поэлементное умножение. Таким образом мы получаем изображение, в котором область, где почти наверняка лазера нет, состоит из пикселей значение которых равно нулю, остальная же часть остаётся нетронутой.

Это изображение затем передаётся в следующий блок алгоритма для выделения лазера.

#### 4.2.2. Выделение лазера

Для постановки задачи выделения лазера в первую очередь необходимо определить, что из себя представляет линия лазера на изображении. В нашем случае линия лазера в кадре располагается параллельно оси  $X$  изображения. Интенсивность в профиле лазера, т.е. сечении в перпендикулярном линии

направлении, соответствует Гауссовому распределению [5; 6] с некоторым шумом. Пик интенсивности, без учета шума, соответствует центру полосы лазера.

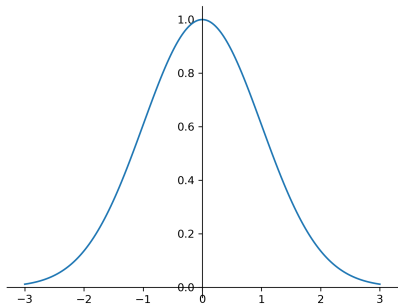


Рисунок 4.4 – Распределение Гаусса

Таким образом задача выделения лазера на изображении в первом приближении сводится к определению пика интенсивности для каждого профиля лазера, то есть в нашем случае для каждой колонки пикселей изображения.

Однако задача усложняется наличием шумов на изображении, которые постоянно искажают профиль интенсивности лазера. Причиной шумов могут являться светочувствительный сенсор в камере, явление самозасвета лазера, неподходящие условия окружения, программная обработка изображения на этапе кодирования-декодирования и так далее.

Также в зависимости от поверхности, на которую падает лазер, профиль может искажаться. Например при падении на края или за ними распределение «разрезается» и часть его становится менее яркой. Это происходит из-за того что центр лазера уже прошёл кромку объекта и находится в слепой зоне, но остальная часть всё ещё освещает кромку и яркость на этом участке ярче центра лазера [7]. **как-то странно, переписать**

Помимо этого в общем случае линия лазера на изображении не является непрерывной. Разрывы могут возникать в следствии недостаточной контрастности лазера или попадания линии лазера в слепую зону. Эта проблема также требует какого-то решения.

Рассмотрим существующие алгоритмы для выделения лазера на изображении и как они справляются с упомянутыми проблемами.

**Метод максимальной интенсивности** Данный метод находит максимум интенсивности в каждой колонке изображения и считает этот максимум цен-

тром лазера. Этот метод обладает пиксельной точностью.

**Laplacian of Gaussian** На реальных изображениях пик профиля лазера как правило срезан, поэтому метод максимумов в данном случае не даёт максимальной точности[6].

Чтобы это преодолеть к изображению можно применить LoG преобразование, то есть применить гауссовое размытие, после чего вычислить вторую производную по изображению. Полученный результат инвертировать. Данный метод в общем случае используется для выделения краёв и линий на изображении[8]. Для использования этого метода необходимо выбрать дисперсию  $\sigma$  гауссового распределения. При малых  $\sigma$  таким образом возможной найти линии малой толщины, при больших  $\sigma$  наоборот, но одновременно за одно преобразование находить линии сильно отличающейся толщины невозможно. Параметр  $\sigma$  можно найти эмпирически, но можно воспользоваться оценкой  $\sigma > \frac{w}{\sqrt{3}}$  из работы [8], где  $w$  – ширина линии лазера в пикселях.

Данный метод также обладает пиксельной точностью

Недостатками этого метода являются ухудшение детектирования на краях, так как происходит размытие изображения, необходимо больше времени на обработку по сравнению с методом максимумов и ggm, невозможность одновременно определять линии разной толщины (такая ситуация возникает, когда измеряются высокие объекты и линия лазера в кадра становится заметно шире).

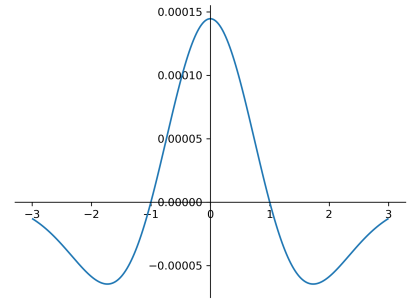


Рисунок 4.5 – Профиль интенсивности лазера после LoG преобразования

**Квадратичная аппроксимация** Предыдущие два метода возможно улучшить и привести точность к субпиксельной[6]. Если рассмотреть профиль интен-

сивности лазера по пикселям, то в общем случае действительный максимум приходится на значение между пикселей. Также можно заметить что в окрестности максимума профиль представляет собой некоторую параболу  $y = ax^2 + bx + c$ . Взяв три точки – точку перед максимумом, точку максимума, точку после максимума – легко найти коэффициенты этой параболы и, соответственно, вершину, которая будет являться действительным максимумом.

Данный метод лучше применим к LoG трансформации, т.к. уже было сказано, что изначальный профиль лазера как правило обрезан при вершине. Однако в определённых условиях можно применять данный подход и для метода максимумов.

**Gray-Gravity Method** и как это по русски? Метод субпиксельной точности[9]. По данному методу центр лазера  $(i_c, j_c)$  рассчитывается как "центр масс" интенсивностей в колонке  $j_c$  изображения по формуле

$$i_c = \left( \sum_{i=1}^H I(i, j_c) \cdot i \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^H I(i, j_c) \right)^{-1} \quad (4.1)$$

где  $H$  – высота кадра в пикселях,  $I(i, j_c)$  интенсивность  $i$  – го пикселя в колонке.

Этот метод крайне чувствителен к шумам, поэтому несмотря на субпиксельную точность его применение в задачах требующих высокой точности нежелательно.

Однако данный метод очень быстр, поскольку вычисления простые.

**Improved Gray-Gravity Method** Улучшенный вариант предыдущего метода[9]. Предполагает два основных шага – предварительное определение центра лазера методом центра масс, затем уточнение координаты.

Уточнение координаты происходит следующим образом: С помощью методом скользящих наименьших квадратов находится касательная, нормаль и кривизна линии в точке предварительного центра. На основе этих значений подбирается прямоугольная область ограничивающая множество точек для расчётов.

Затем рассчитывается отклонение действительного центра лазера от предварительного на основе интенсивности точек в регионе и их расстояния до линии пересекающей предварительный центр по направлению касательной в этой точке.

Достоинством этого метода является то, что он учитывает направление линии лазера в кадре и кривизну линии. Предыдущие методы предполагают что лазер параллелен оси  $x$  изображения, из-за чего теряют несколько в точности.

Однако данный метод сложнее реализовать и он также требует больше вычислений чем предыдущие методы.

**Statistical Steger Analysis** Метод основанный на статистическом анализе распределения интенсивности профиля лазера. В работе [5] выдвигается математический аппарат для определения параметров распределения лазера на основе данных с изображения, в частности соотношения сигнал/шум.

Суть данного метода заключается в том, чтобы отыскать реальное распределение интенсивности лазера на изображении без влияния шума и таким образом найти реальный центр лазера.

Достоинствами этого метода являются высокая устойчивость к шумам и высокая точность определения центра лазера.

Недостатком является большое время выполнения даже для одного изображения, что не позволяет использовать этот метод в задачах требующих быстрого выполнения.

**Usamentiaga Method** [10]

**Выбранный метод**

### 4.2.3. Привязка координат

Ранее было сказано, что в виду аппаратных ограничений видео сканирования в общем случае начинается в неопределённый момент перед рабочей зоной. При этом нет возможности узнать координату сканера в момент начала записи видео. Это порождает проблему несоответствия рассчитанных в процессе обработки координат и реальных. Таким образом необходимо разработать алгоритм, который позволял бы по данным с видео определить необходимое смещение координат.

Основная идея такого алгоритма состоит в том, что необходима уникальная метка-идентификатор, имеющая заранее известную координату. Такая метка и алгоритм должны удовлетворять следующим требованиям:

- Лёгкое определение по входному видео
- Устойчивость к ложноположительным срабатываниям
- Лёгкое внедрение в конструкцию
- Минимальное влияние на общее время работы алгоритма

Предлагается использовать рельефные идентификаторы на столе, которые будут образовывать некоторый паттерн схожий с идеей штрихкода. Таким образом после сканирования в облаке точек сцены будет видна данная метка, которую возможно распознать программными методами и рассчитать необходимое смещение.

В конечном итоге идентификатор представляет собой ряд меток расположенных на некотором заданном расстоянии друг от друга. Метки же в свою очередь представляют некоторую прямоугольную поверхность заданной ширины на определённой высоте от стола. Высота от стола для всех меток одинаковы, остальные параметры произвольны.

Алгоритм перебирает профили сцены в облаке точек и сравнивает их на соответствие заданному идентификатору. Как только алгоритм находит подхо-



дящий профиль рассчитывается необходимое смещение, которое применяется ко всем координатам в облаке.

### 4.3. Блок поиска объектов

Задача поиска объектов в произвольном облаке точек одна из сложнейших. Такие задачи в настоящее время пытаются решить с использованием нейронных сетей и «искусственного интеллекта». На данный момент нет стандартных подходов к решению этой задачи.

Однако в нашем случае задача значительно упрощается по следующим причинам:

- у нас есть карта глубины с прямым соответствием пикселей и реальных координат
- объекты довольно простые ( **типа плоские** )
- необходимо распознать только верхнюю часть объектов

Поэтому мы можем перевести задачу из распознавания объектов в пространстве в распознавание замкнутых контуров на изображении.

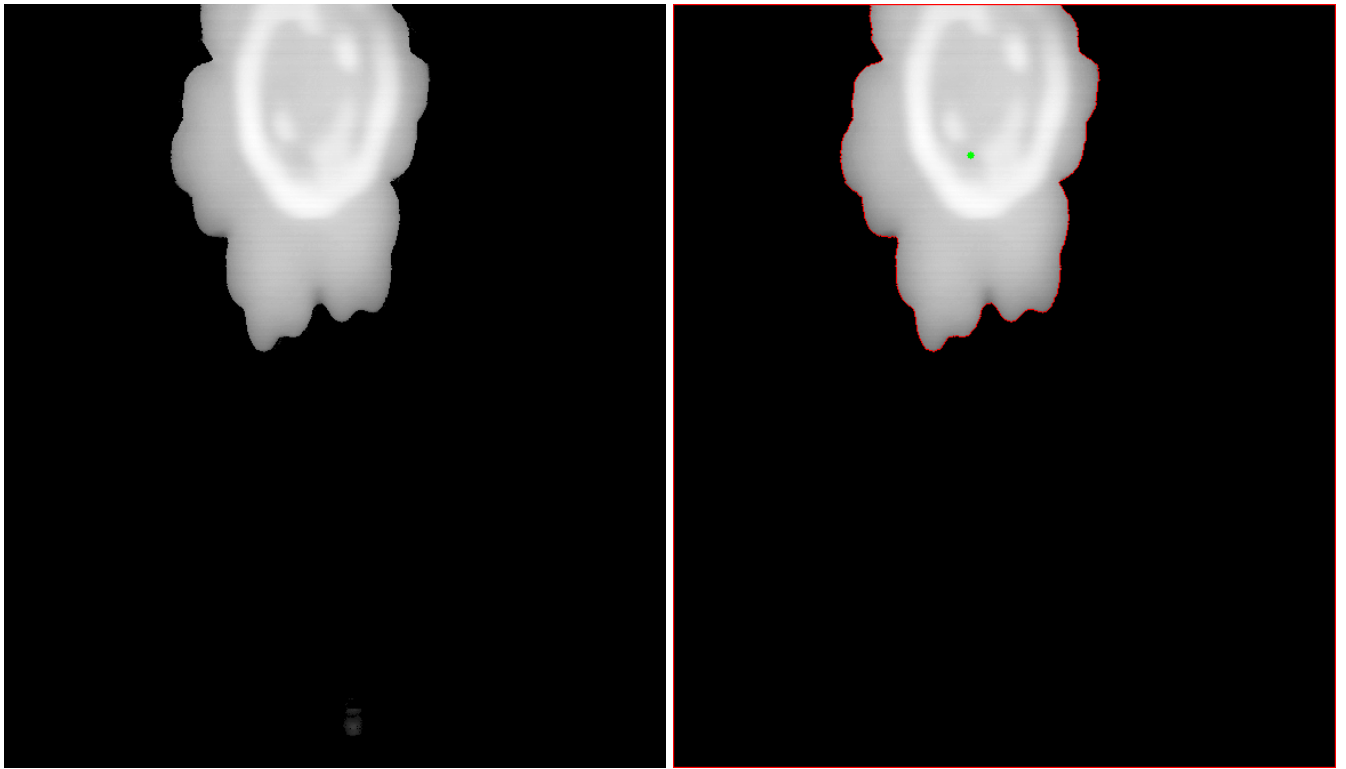
#### **БЛОК-СХЕМА**

На вход алгоритму подаётся карта глубины сцены, на которой видны изделия. Применив к изображению алгоритм watershed мы найдём контур для каждого объекта, даже в случае их прямого соприкосновения. Поскольку карта глубины даёт прямое соответствие между пикселями и координатами, то наш контур задаётся некоторым пространственным многоугольником. Отбросив  $z$  координату, получим проекцию контура на плоскость. Затем можно рассчитать моменты этого контура и получить его центроиду. Так же через моменты можно найти ориентацию контура в пространстве (поворот вокруг центра), это эквивалентно вписыванию эллипса в контур и нахождения угла наклона главной диагонали.

Таким образом для каждого найденного контура программой формируется объект содержащий следующие данные:

- область в облаке точек, содержащую только этот контур
- координату центра объекта в плоскости
- ориентацию объекта в плоскости

Область в облаке сохраняется с целью оптимизации по времени алгоритма проекции рисунка на рельеф.



(a) Карта глубины поданная на вход

(б) Обнаруженные объекты

Рисунок 4.6 – Пример работы алгоритма

#### 4.4. Блок обработки dxf

#### 4.5. Блок генерации gcode

## **ОПИСАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ**

## Заключение

## Список литературы

1. *Гужов В. И.* Методы измерения 3D-профиля объектов. Контактные, триангуляционные системы и методы структурированного освещения: учеб. пособие. — 2015. — с. 1—82. — ISBN 9785778227279.
2. Выпускная квалификационная работа "Разработка системы автоматического фигурного нанесения пищевых продуктов". — 2018.
3. Machine vision system for curved surface inspection / M.-F. R. Lee [и др.] // Machine Vision and Applications. — 2000. — т. 12, № 4. — с. 177—188. — ISSN 0932-8092. — DOI: [10.1007/s001380000043](https://doi.org/10.1007/s001380000043).
4. OpenCV: Image Thresholding. — режим доступа: [https://docs.opencv.org/3.4/d7/d4d/tutorial\\_py\\_thresholding.html](https://docs.opencv.org/3.4/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html).
5. Statistical behavior analysis and precision optimization for the laser stripe center detector based on Steger's algorithm / L. Qi [и др.] // Optics Express. — 2013. — т. 21, № 11. — с. 13442. — ISSN 1094-4087. — DOI: [10.1364/oe.21.013442](https://doi.org/10.1364/oe.21.013442).
6. Laser line detection with sub-pixel accuracy / A. Molder [и др.] // Elektronika ir Elektrotechnika. — 2014. — т. 20, № 5. — с. 132—135. — ISSN 13921215. — DOI: [10.5755/j01.eee.20.5.7114](https://doi.org/10.5755/j01.eee.20.5.7114).
7. *Давыденко Е. В.* Разработка и анализ алгоритмов цифровой обработки сигналов в задаче оптической лазерной триангуляции : автореф. дисс. канд. тех. наук / Давыденко Егор Викторович. — ВлГУ, 2009.
8. *Steger C.* Subpixel-precise extraction of lines and edges // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. — 2000. — т. XXXIII. — с. 141—156. — режим доступа: <http://ias.in.tum.de/people/steger/publications/2000/ISPRS-Congress-00-Steger.pdf>.

9. Sub-pixel extraction of laser stripe center using an improved gray-gravity method / Y. Li [и др.] // Sensors (Switzerland). — 2017. — т. 17, № 4. — ISSN 14248220. — DOI: [10.3390/s17040814](https://doi.org/10.3390/s17040814).
10. *Usamentiaga R., Molleda J., García D. F.* Fast and robust laser stripe extraction for 3D reconstruction in industrial environments // Machine Vision and Applications. — 2012. — т. 23, № 1. — с. 179—196. — ISSN 09328092. — DOI: [10.1007/s00138-010-0288-6](https://doi.org/10.1007/s00138-010-0288-6).