

Оглавление

Введение	2
Глава 1. ОБЗОР АНАЛОГОВ	5
Глава 2. ВЫБОР ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СКАНЕРА	10
2.1. Выбор метода сканирования	10
2.2. Выбор компонентов	10
Глава 3. ВЫВОД НЕОБХОДИМЫХ УРАВНЕНИЙ	11
3.1. Конфигурации модели	11
3.1.1. Модель в системе координат принтера	11
3.1.2. Модель в системе координат камеры	12
3.1.3. Выбор модели	14
3.2. Оценка теоретической погрешности	14
3.3. Калибровка сканера	14
Глава 4. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ВИДЕО	15
4.1. Этапы работы алгоритма сканирования	15
4.2. Обзор алгоритмов обработки входных данных	15
Глава 5. Алгоритм обработки в Gcode	16
Глава 6. Описание работы системы	17
Заключение	18

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.

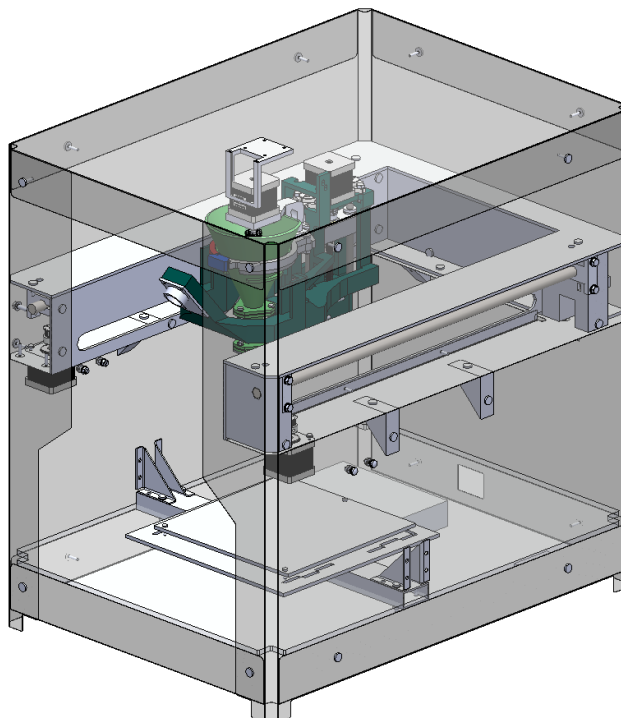


Рисунок 1 – Прототип системы автоматического фигурного нанесения пищевой пасты

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 ± 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 получают раз-

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).

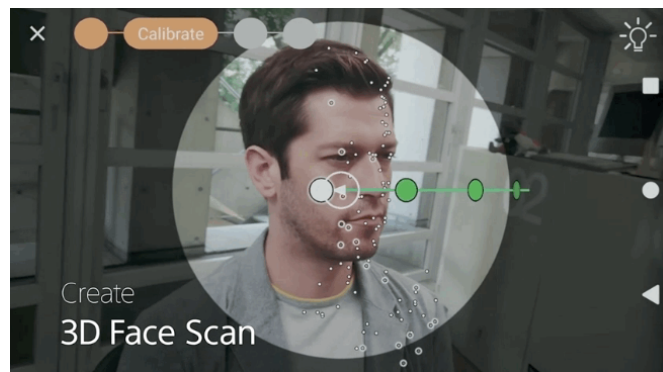


Рисунок 1.1 – Окно приложения Sony 3D creator

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 снимков¹. [тут ссылка](#)

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

¹ Гужов

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	≈ 1 м
Скорость	По завершению съёмки
Точность	≈ 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.

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 специальный рисунок (паттерн), как правило чередующихся чёрных и белых полос.

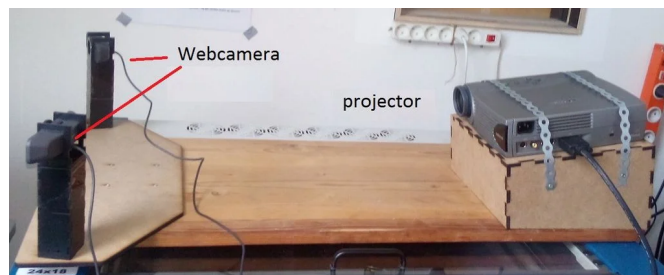


Рисунок 1.3 – Сканер hesamh

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	≈ 0.5 мм
Габариты	$1000 \times 500 \times 300$ мм
Стоимость	~ 10000 р.

Глава 2

ВЫБОР ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СКАНЕРА

2.1. Выбор метода сканирования

В результате обзора аналогов видно, что готовые устройства нам не подходят.

2.2. Выбор компонентов

Камера

Лазерный модуль

Глава 3

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.

3.1.1. Модель в системе координат принтера

Первая модель подразумевает расчёт в системе координат принтера, привязана к реальным элементам в сборке и отражает реальную конструкцию модуля. Главными параметрами являются H — высота камеры над столом и α — угол наклона камеры от вертикали. 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

ХЗ КАК ПО ДРУГОМУ ЩАС НАПИСАТЬ

Таким образом приходим к следующим уравнениям

$$\begin{aligned} z &= H \frac{\sin(\beta - \beta_0)}{\sin((\beta - \beta_0) - \alpha) \cos(\alpha + \beta_0)} \\ x &= x_k - H \operatorname{tg}(\alpha + \beta_0) \\ y &= y_k - (H - z) \frac{\Delta u}{f \cos \alpha} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Преимущества этой модели:

- H можно измерять напрямую

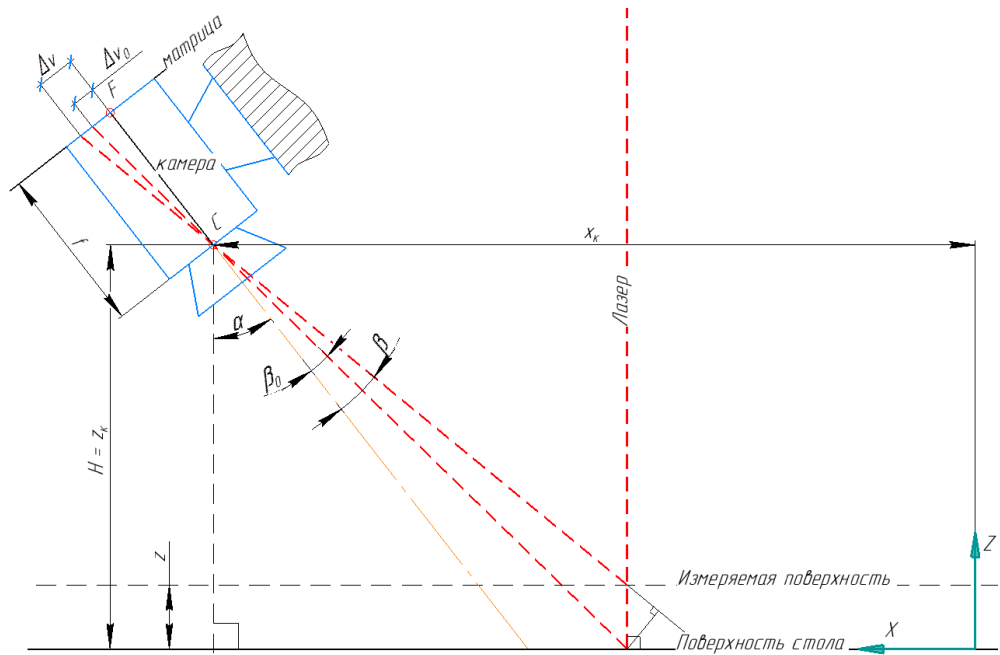


Рисунок 3.1 – Чертёж поясняющий вычисления

- 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

3.1.2. Модель в системе координат камеры

Вторая модель основывается на теоретических величинах и расчёт происходит в два этапа. Первый – расчёт координат относительно камеры, второй – преобразование в систему координат принтера. В этом методе главными параметрами являются высота камеры H над рабочей плоскостью и угол между

камерой и лазером α , но они рассчитываются теоретически и не совпадают с аналогичными из предыдущего метода. 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 *орепсв* можно полностью определить положение камеры в пространстве используя шахматный паттерн. В системе координат камеры получаем:

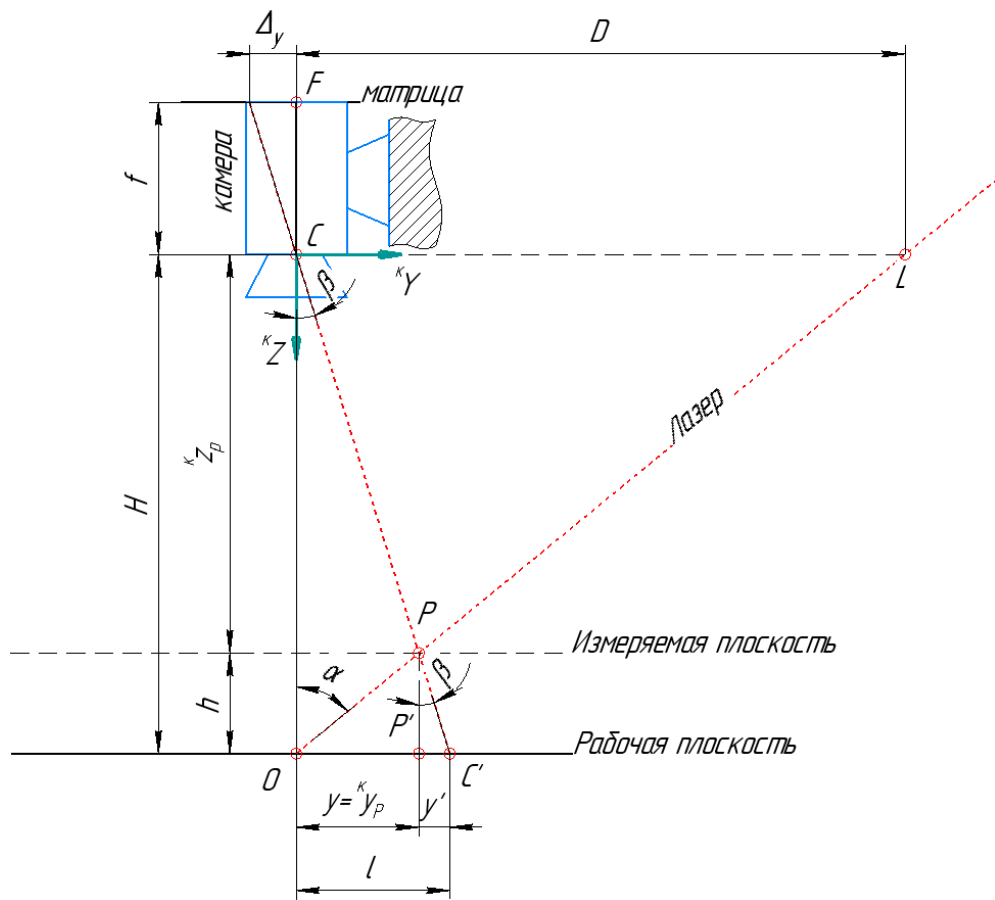


Рисунок 3.2 – Чертёж поясняющий вычисления

$$\begin{aligned}
 x_p^{\kappa} &= H \frac{\operatorname{tg} \alpha \frac{\Delta x}{f}}{\operatorname{tg} \alpha + \frac{\Delta y}{f}} \\
 y_p^{\kappa} &= H \frac{\operatorname{tg} \alpha \frac{\Delta y}{f}}{\operatorname{tg} \alpha + \frac{\Delta y}{f}} \\
 z_p^{\kappa} &= H \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha + \frac{\Delta v}{f}}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Для перевода в систему координат принтера:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} {}^{\text{к}}x_p \\ {}^{\text{к}}y_p \\ {}^{\text{к}}z_p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{\text{к}} \\ y_{\text{к}} \\ z_{\text{к}} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Преимущества модели:

- отсутствие тригонометрии в расчётах координат
- параметры H и α фиксированы
- меньшее количество допущений
- сложно прямо измерить H и α , необходим теоретический расчёт
- необходима матрица поворота камеры

3.1.3. Выбор модели

3.2. Оценка теоретической погрешности

3.3. Калибровка сканера

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ВИДЕО

4.1. Этапы работы алгоритма сканирования

4.2. Обзор алгоритмов обработки входных данных

Выбор алгоритмов

Глава 5

Алгоритм обработки в Gcode

Глава 6

Описание работы системы

Заключение