

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И ИНФОРМАТИКИ  
Кафедра теории вероятностей и математической статистики

ДЕРНОВСКАЯ Александра Павловна

**ЭФФЕКТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ РЕГИСТРАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ  
3D-ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО  
СКАНИРОВАНИЯ**

Магистерская диссертация  
специальность 1-31 80 09 «Прикладная математика и информатика»  
*шифр* *название*

Научный руководитель  
Васильков, Дмитрий, Михайлович  
кандидат физ.-мат. наук, доцент

Допущена к защите  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.  
Зав. кафедрой \_\_\_\_\_  
Харин, Алексей, Юрьевич  
доктор физ.-мат. наук, профессор

Минск, 2022

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Ключевые слова:** 3D-СКАНИРОВАНИЕ, 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ, РЕГИСТРАЦИЯ ОБЛАКОВ ТОЧЕК, РЕКОНСТРУКЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ИТЕРАТИВНЫЙ МЕТОД БЛИЖАЙШИХ ТОЧЕК, КОНСЕНСУС СЛУЧАЙНОЙ ВЫБОРКИ.

**Целью работы** является разработка приложения на устройстве Apple iPhone 12 Pro для пространственного сканирования, которое с помощью съемки объекта реального мира позволит получить его замкнутую полигональную пространственную модель.

**Актуальность** данного исследования обусловлена отсутствием на мировом рынке программ с подобной функциональностью в сегменте приложений сканирования.

**Объект исследования:** методы 3D регистрации облаков точек для построения замкнутых полигональных пространственных моделей, такие как итеративный метод ближайших точек, консенсус случайной выборки и другие.

**Результатом выполненной работы** является разработанное при поддержке компании InData Labs приложение для устройства Apple iPhone 12 Pro. Данное приложение для пространственного сканирования с помощью съемки объектов реального мира позволит получить замкнутую полигональную пространственную модель.

**Областью применения** является компьютерная графика, 3D-печатание, медицина.

**Структура магистерской диссертации.** Работа изложена на 37 страницах, состоит из разделов «Общая характеристика работы», «Введение», 2 глав, разделов «Заключение» и «Список использованных источников» из 12 наименований, а также - публикаций магистранта.

## АГУЛЬНАЯ ХАРАКТАРЫСТЫКА ПРАЦЫ

**Ключавыя словы:** 3D-СКАНАВАННЕ, 3D-МАДЭЛЯВАННЕ, РЭГІСТРАЦЫЯ АБЛОКАЎ КРОПАК, РЭКАНСТРУКЦЫЯ, АДНАЎЛЕННЕ ПАВЕРХНЯЎ, ІТЭРАТЫЎНЫ МЕТАД НАЙБЛІЖЭЙШЫХ КРОПАК, КАНСЕНСУС СЛУЧАЙ.

**Мэтай працы** з'яўляецца распрацоўка дадатку на прыладзе Apple iPhone 12 Pro для прасторавага сканавання, якое з дапамогай здымкі аб'екта рэальнага свету дазволіць атрымаць яго замкнёную паліганальную прасторавую мадэль.

**Актуальнасць** дадзенага даследавання абумоўлена адсутнасцю на сусветным рынку праграм з падобнай функцыянальнасцю ў сегменце прыкладанняў сканавання.

**Аб'ект даследавання:** метады 3D рэгістрацыі аблокаў кропак для пабудовы замкнёных паліганальных прасторавых мадэляў, такія як ітэратыўны метады бліжэйшых кропак, кансэнсус выпадковай выбаркі і іншыя.

**Вынікам выкананай працы** з'яўляецца распрацаванае пры падтрымцы кампаніі InData Labs прыкладанне для прылады Apple iPhone 12 Pro. Дадзенае прыкладанне для прасторавага сканавання з дапамогай здымкі аб'ектаў рэальнага свету дазволіць атрымаць замкнёную паліганальную прасторавую мадэль.

**Вобласцю ўжывання** з'яўляецца кампутарная графіка, 3D-друкаванне, медыцына.

**Структура магістарскай дысертацыі.** Праца выкладзена на 37 старонках, складаецца з раздзелаў «Агульная характарыстыка працы», «Уводзіны», 2 частак, раздзелаў «Заклучэнне» і «Спіс выкарыстаных крыніц» з 12 найменняў, а таксама 1 публікацый магістранта.

## SUMMARY

**Keywords:** 3D-SCANNING, 3D-MODELING, POINT CLOUD REGISTRATION, RECONSTRUCTION, SURFACE RECONSTRUCTION, ITERATIVE CLOSEST POINT (ICP), RANDOM SAMPLE CONSENSUS (RANSAC).

**The Purpose of this research** is the development of an application on the Apple iPhone 12 Pro device for spatial scanning, which, by shooting a real-world object, will allow you to get its closed polygonal spatial model.

**The Topicality of the research** is conditioned by the lack of programs with similar functionality in the segment of scanning applications on the world market.

**The Object of the research** is 3D point cloud registration methods for building closed polygonal spatial models, such as the iterative method of nearest points, random sampling consensus, and others.

**The result of the work** is the application for the Apple iPhone 12 Pro developed with the support of InData Labs. This application for spatial scanning provides closed polygonal spatial models based on scans of real objects.

**The Scope of application** is computer graphics, 3D-printing and medicine.

**The Structure of the thesis.** The total volume of the thesis comprises 37 pages. The master's thesis consists of an introduction, summary, 2 chapters, conclusions and bibliography (12 sources, and also 1 publications of the student).

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Перечень условных обозначений, сокращений, символов и терминов.....	6
Введение.....	7
Глава 1. Пространственное сканирование объектов .....	10
1.1 Обзор существующих сканеров .....	10
1.2 Обзор существующих приложений для 3D-сканирования на устройстве Apple iPhone 12 Pro .....	11
1.3 Получение данных.....	11
1.4 Предобработка данных.....	13
1.4.1 Фильтрация кадров.....	13
1.4.2 Конвертация точек RGBD изображения в точки 3D-пространства .....	15
Глава 2. Регистрация облаков точек.....	18
2.1 Покадровая регистрация .....	18
2.1.1 Итеративный алгоритм ближайших точек.....	19
2.1.2 По позициям датчиков ARKit .....	22
2.1.3 Консенсус случайной выборки .....	23
2.2 Полная модель.....	24
2.3 Постобработка облака точек.....	26
2.4 Сравнение моделей с разных устройств.....	26
Заключение .....	30
Список использованных источников .....	31
Приложение А .....	32
Приложение Б.....	33
Приложение В.....	34

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ, СИМВОЛОВ И ТЕРМИНОВ

**RGBD-кадр** – пара, состоящая из RGB-кадра и карты глубины (Depth - глубина).

**Синхронизированный RGBD-кадр** - RGBD-кадр, в котором RGB-кадр и Depth-кадр были сделаны практически в один момент времени.

**Облако точек (point cloud)** – множества точек в трехмерном пространстве, где точки облака задаются набором координат и иногда цветом в этой точке.

**Регистрация (registration)** облаков точек – процедура нахождения нужного аффинного преобразования для совмещения пары заданных облаков точек.

**Меш (mesh)** – полигональная сетка.

**Реконструкция (reconstruction)** – построение из облака точек меша.

**Текстурирование** – наложение текстур на полученный меш.

**Полная модель** – замкнутая полигональная пространственная модель (многообразие, с точки зрения математической топологии).

**Полное облако точек** – облако точек, соответствующее полной модели.

**ICP** – итеративный алгоритм ближайших точек.

**RANSAC** – алгоритм консенсуса случайной выборки.

## ВВЕДЕНИЕ

Данная работа посвящена алгоритмам регистрации и моделирования 3D-объектов на основе данных пространственного сканирования с помощью устройства Apple iPhone 12 Pro.

Основная цель – разработка приложения на устройстве Apple iPhone 12 Pro для пространственного сканирования, которое с помощью съемки реального объекта позволит получить его замкнутую полигональную пространственную модель. Это также является отличительной особенностью данной программы в сегменте приложений сканирования, т.к. остальные не имеют подобной функциональности (подробнее в разделе 1.2).

Используемое устройство обладает двумя RGB-камерами (передняя и задняя) и двумя датчиками глубины: датчик Apple TrueDepth совмещен и синхронизирован с передней камерой, датчик Apple Lidar - с задней (пример данных на рис. 1).



Рисунок 1. Кадры, полученные в результате RGBD-сканирования с помощью Apple Lidar.



сетки, или меша (mesh), и наложение текстур на полученный меш. Таким образом получается полная модель (см. пример на рис. 3).

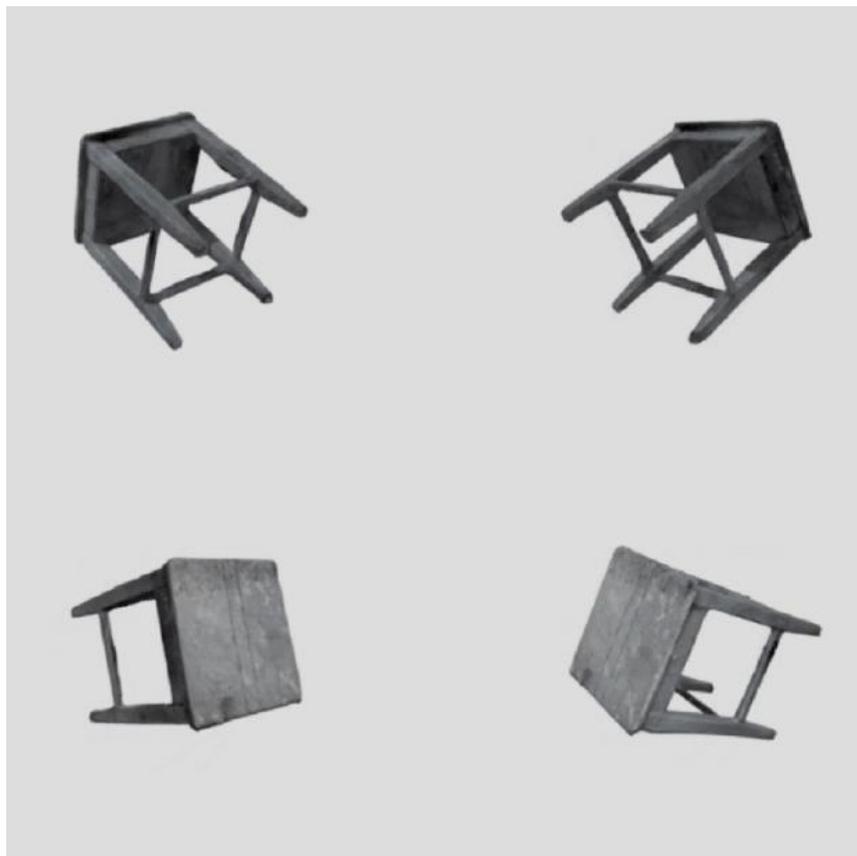


Рисунок 3. Пример полной модели

# ГЛАВА 1. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ СКАНИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ

## 1.1 Обзор существующих сканеров

3D-сканер — устройство, которое позволяет получить данные о форме объекта реального мира, затем на основе этих данных сканирования возможно создать цифровую копию, или 3D-модель, этого объекта. На данный момент на мировом рынке присутствует множество различных устройств и приложений для пространственного сканирования и реконструкции объектов реального мира.

Существуют такие профессиональные сканеры, как CREAFORM HANDYSCAN 700, ARTEC EVA, FARO FOCUS 3D X130 и другие, которые используются на производствах в сферах 3D-печатания, медицины и так далее. Они позволяют получить модель высокой точности, однако такие устройства не являются легко доступными для каждого человека, а цены на них порядка десятков тысяч долларов (см. приложение В).

Также есть такие устройства как Microsoft Azure Kinect и Intel RealSense. Они позволяют получить синхронизированные RGBD-кадры в отличие от сканеров мобильных устройств Samsung и Huawei (см. таблицу 1).

Технические характеристики	Разрешение RGB-камеры	Разрешение датчика глубины	Синхронизация
Microsoft Azure Kinect	3840 x 2160	640 x 576	Да
Intel RealSense	1920 x 1080	1280 x 720	Да
Samsung ToF	4096 x 2160	240 x 180	Нет
Huawei ToF	2340 x 1080	280 x 180	Не известно

Таблица 1. Разрешения камер устройств Microsoft Azure Kinect, Intel RealSense, Samsung.Huawei

## 1.2 Обзор существующих приложений для 3D-сканирования на устройстве Apple iPhone 12 Pro

Для устройства Apple iPhone 12 Pro существует большое количество приложений для сканирования и получения 3D-моделей, поэтому рассмотреть все эти программы не представляется возможным и далее рассмотрим 3 самые популярные, а именно: 3D Scan App, Scaniverse, Capture.

3D Scan App, Scaniverse позволяют производить съемку пространств посредством задней камеры и датчика глубины Apple Lidar. Их решение построено на базе ARKit (подробнее в разделе 2.1.2).

Приложение Capture позволяет производить съемку объекта посредством передней камеры и датчика глубины Apple TrueDepth. Данное решение основано на ICP подобном алгоритме, во время съемки происходит поиск замкнутого цикла, а также создается маска, по которой вырезается снимаемый объект. Таким образом получается модель объекта реального мира, в которой отсутствует часть в области опоры.

Однако, ни одно из существующих приложений для Apple iPhone 12 Pro не предоставляет возможность построения замкнутой полигональной пространственной модели.

## 1.3 Получение данных

Для построения 3D моделей способами, описанными далее, будем использовать последовательность RGBD-кадров.

*Depth-кадр*, или *карта глубины*, — это прямоугольный массив, каждый элемент которого содержит расстояние от точки объекта до точки фокуса камеры. На рисунке 4 представлен пример карты глубины.

Во время работы были проведены эксперименты со следующими устройствами:

- Apple TrueDepth
- Apple Lidar
- Azure Kinect
- Real Sense
- Samsung ToF
- Huawei ToF

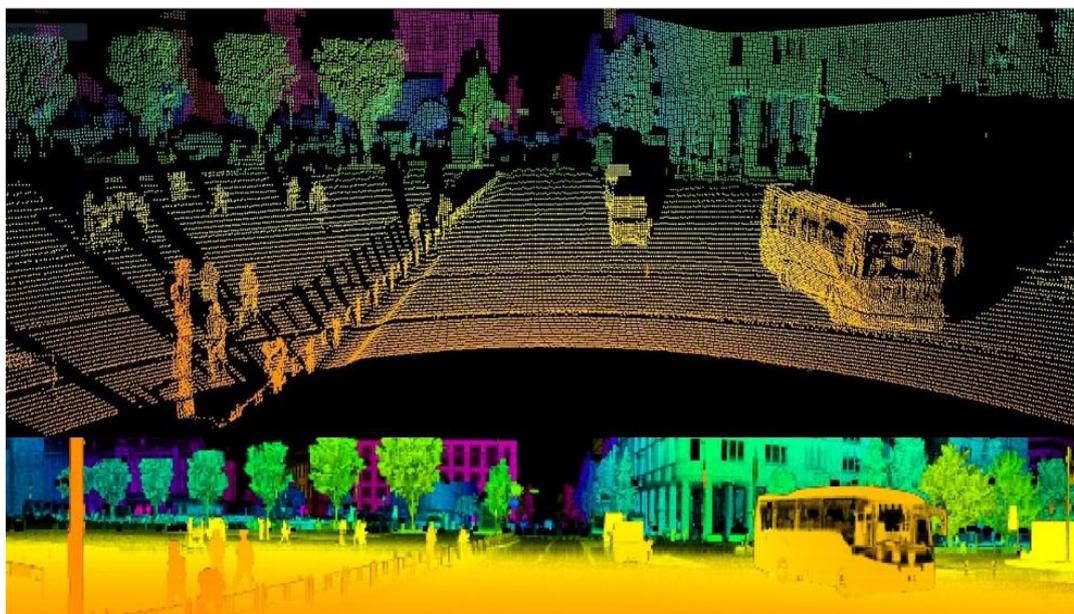


Рисунок 4. Пример depth-кадра. Цвет каждой точки соответствует расстоянию от позиции камеры до этой точки.

У каждого из этих устройств имеются свои преимущества и недостатки (разная дальность, разное разрешение совмещенной RGB-камеры, разные методы регистрации более эффективны при работе с ними и так далее).

Несмотря на то что эксперименты и были проведены с каждым устройством из списка выше, однако далее будут рассматриваться наборы данных, полученные на Apple iPhone 12 Pro на переднюю и заднюю камеру с соответствующими датчиками глубины: Apple TrueDepth и Apple Lidar. Такое решение было принято в рамках бизнес-интересов компании InData Labs, при поддержке которой было проведено данное исследование, т.к. это устройство является наиболее доступным и актуальным для конечного пользователя, заинтересованного данным сегментом рынка приложений.

В таблице 2 представлены некоторые технические характеристики рассматриваемого устройства.

Технические характеристики	Apple Lidar и задняя камера	Apple TrueDepth и передняя камера
Разрешение RGB-камеры	4290 x 2800	4290 x 2800
Фокусное расстояние RGB-камеры	26 мм	23 мм

Размер пикселя RGB-камеры	1.4 микрон	1.0 микрон
Разрешение датчика глубины	~160x128	640x480
Максимальная дальность датчика глубины	15м	5м
Размер пикселя датчика глубины	1.0668 м	Не известно
Синхронизация	Да	Да

Таблица 2. Технические характеристики устройства Apple iPhone 12 Pro

Для получения полных моделей необходимы такие наборы данных, из которых можно получить как минимум 2 модели одного и того же объекта, снятых с разных ракурсов. Можно сделать это следующим образом: поставить объект на некоторую поверхность или опору, провести сканирование, затем перевернуть и еще раз отсканировать так, чтобы покрыть все стороны объекта.

## 1.4 Предобработка данных

С помощью предобработки данных можно ускорить работу и улучшить сходимость алгоритмов, а также сэкономить ресурсы программы, что особенно важно в рамках разработки для мобильного устройства, которое по определению является не высокопроизводительным, в особенности по сравнению с устройствами, на которых ведется разработка.

### 1.4.1 Фильтрация кадров

Будем предполагать, что в процессе съемки объекта камера движется вдоль траектории, близкой к окружности, а сам объект расположен вблизи ее центра. Такое предположение дает возможность приблизительно оценить направление камеры между двумя последовательными кадрами. Это необходимо, потому что имеют место человеческий фактор и различные условия съемки и реального мира, они, например, влияют на угловую скорость и диаметр окружности траектории. А также угол между кадрами влияет на

скорость работы алгоритмов, на размер выходного облака и даже на сходимость некоторых методов.

Чтобы провести операцию фильтрации кадров по значению угла, необходимо предварительно вычислить траекторию камеры, а точнее ее позиции  $f_i, i=0...n$ , соответствующие каждому сделанному кадру, а также примерную позицию снимаемого объекта –  $O$  (Object position).

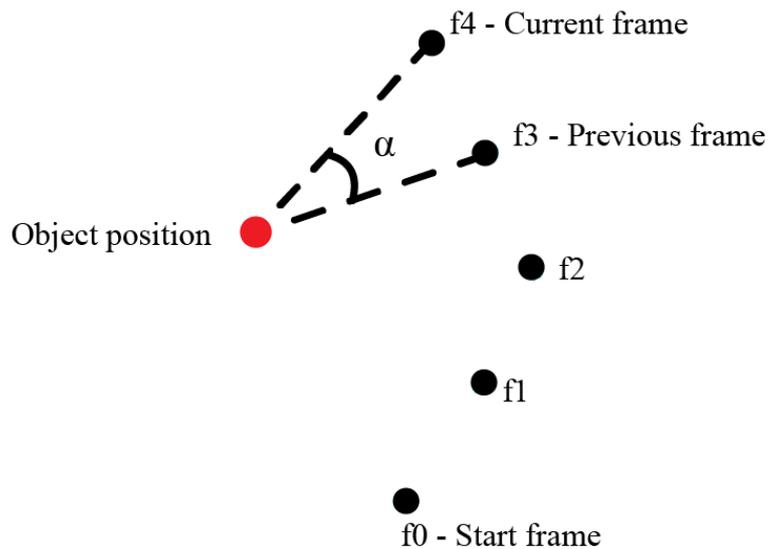


Рисунок 5. Угол поворота камеры между кадрами

Фильтрация состоит в прореживании кадров: угол между текущим и следующим кадрами в траектории должен быть не меньше заданного порогового значения  $\alpha$  (см. рис. 5). Это условие можно записать следующим образом:

$$\angle f_{i_k} O f_{i_{k+1}} \geq \alpha, i = 0, \dots, n - 1.$$

На рисунке 6 проиллюстрированы результаты прореживания кадров по траектории съемки.

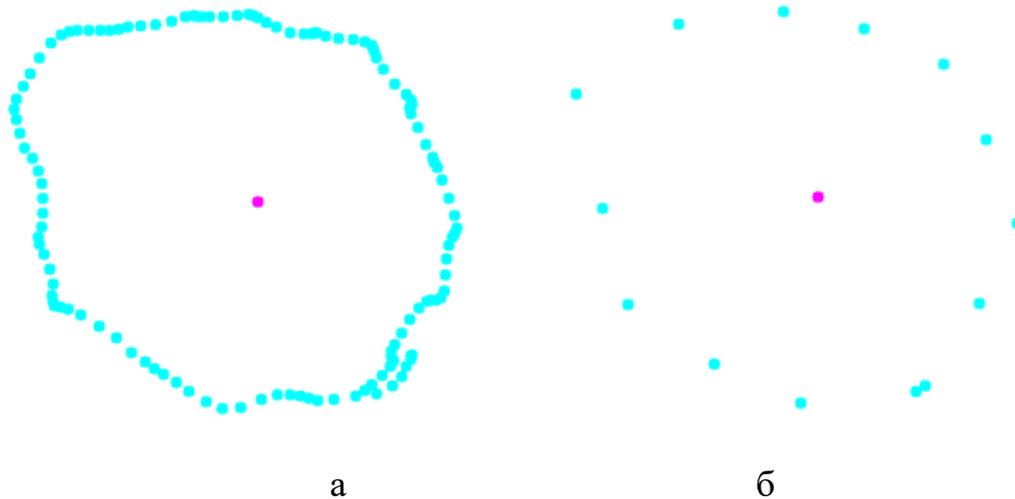


Рисунок 6. а – траектории камеры до фильтрации, б – траектории камеры после фильтрации (вид сверху)

Не всегда во время съемки есть возможность в онлайн-режиме отслеживать позицию камеры относительно позиции объекта, поэтому в данном случае будем использовать фильтрацию кадров по углу поворота уже по окончании сканирования.

Также необходимо отслеживать замкнутый цикл в траектории движения камеры вокруг объекта. Это нужно для того, чтобы не тратить ресурсы программы на обработку кадров, которые были сняты с примерно одного и того же ракурса (см. рис. 6). Это можно отслеживать, например, проверяя еще одно условие на каждой итерации: угол между первым и последним кадрами.

$$\angle f_0 O f_{i_{k+1}} \geq \alpha, \quad i = 0, \dots, n - 1.$$

#### 1.4.2 Конвертация точек RGBD изображения в точки 3D-пространства

Каждый RGBD-кадр представим в виде цветного облака точек. Его можно получить, зная специальные матрицы преобразования: *внутреннюю* (intrinsic) и *внешнюю* (extrinsic) [5]. Внутренняя матрица имеет вид:

$$K = \begin{pmatrix} f_x & s & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где  $f_x, f_y$  – фокусное расстояние камеры,  $x_0, y_0$  – смещение центра координат (см. рис. 7). Эти данные заведомо известны для каждой камеры.

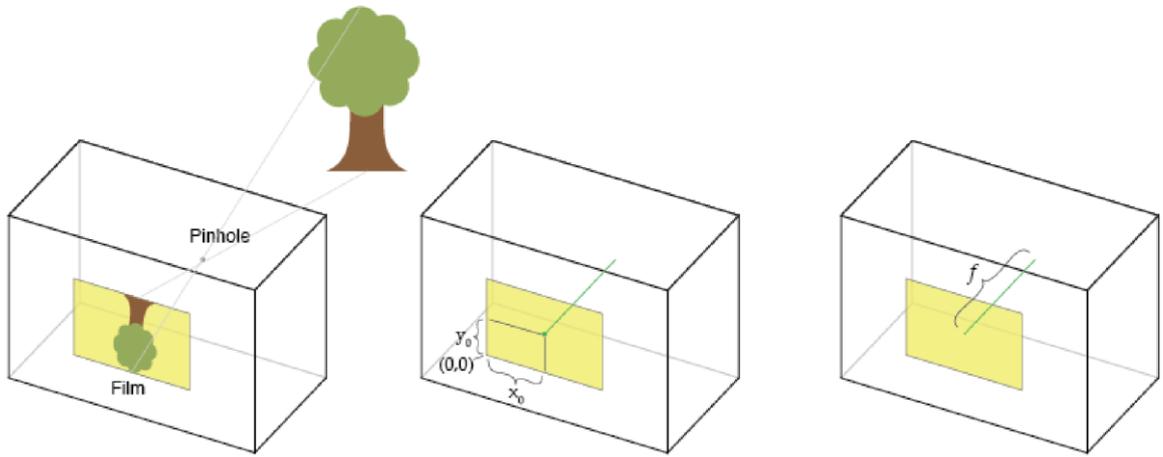


Рисунок 7. Параметры преобразования, используемые для построения внутренней матрицы

В случае, если мировая система координат не совпадает с системой координат камеры, необходимо знать внутреннюю матрицу для данной камеры, чтобы совместить системы координат и получить корректное преобразование (см. рис. 8). Она имеет вид:

$$[R | t] = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{pmatrix}.$$

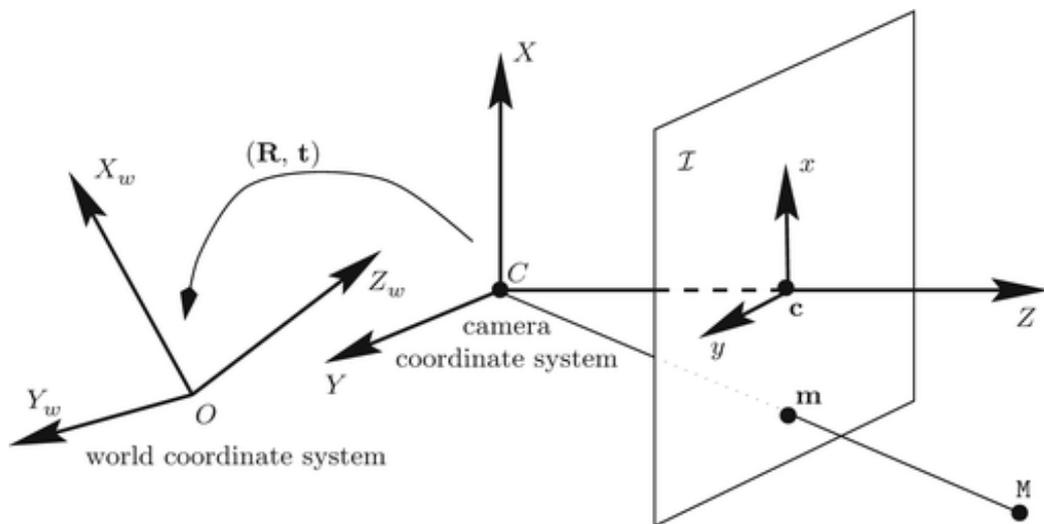


Рисунок 8. Параметры преобразования, используемые для построения внешней матрицы

Таким образом, для получения облака точек необходимо использовать следующее преобразование [5]:

$$P = K \cdot [R | t].$$

Далее приведен псевдокод преобразования RGBD-кадра в облако точек.

```
matrix = intrinsic_matrix * extrinsic_matrix
for (x = 0... frame.width)
  for (y = 0... frame.height)
    point = {x, y, frame[x][y].depth, 1}
    point = matrix * point
    pointcloud.add(point, frame[x][y].color)
```

## ГЛАВА 2. РЕГИСТРАЦИЯ ОБЛАКОВ ТОЧЕК

Регистрация облаков точек – процесс совмещения нескольких облаков точек одного объекта в единую систему координат. Цель регистрации — найти преобразование, которое оптимально совмещает два смежных облака. На рисунке 6 можно увидеть пример регистрации облаков: 9а – два облака до регистрации в изначальных позициях, 9б – облака, совмещенные после регистрации.

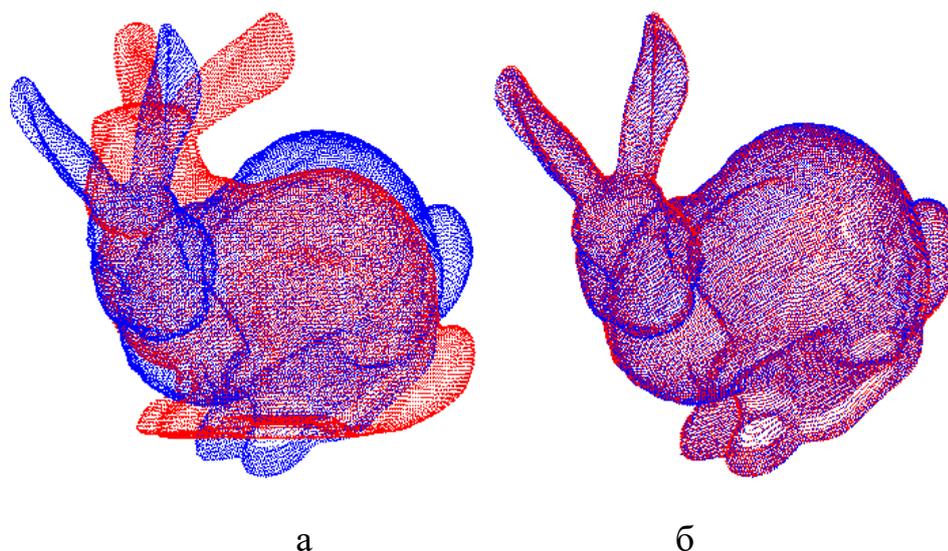


Рисунок 9. а – облака до регистрации, б – облака после регистрации

Далее будут рассматриваться методы покадровой регистрации для построения нескольких неполных моделей, а затем способ построения из них полной модели.

### 2.1 Покадровая регистрация

Для построения “неполных” моделей надо попарно зарегистрировать все кадры в хронологическом порядке, т.е. 1 кадр со 2-ым, 2-ой с 3-им и так далее до n-го. Для этого существует несколько кардинально разных подходов таких, как:

- Итеративный алгоритм ближайших точек (**ICP**)
- По позициям датчиков (**ARKit**)
- Консенсус случайной выборки (**RANSAC**)

Рассмотрим каждый из них подробно.

### 2.1.1 Итеративный алгоритм ближайших точек

Алгоритм ближайших точек или *ICP* — итеративный алгоритм, использующийся для сведения к минимуму разницы между двумя облаками точек. На рисунке 10 можно увидеть несколько итераций алгоритма на примере.

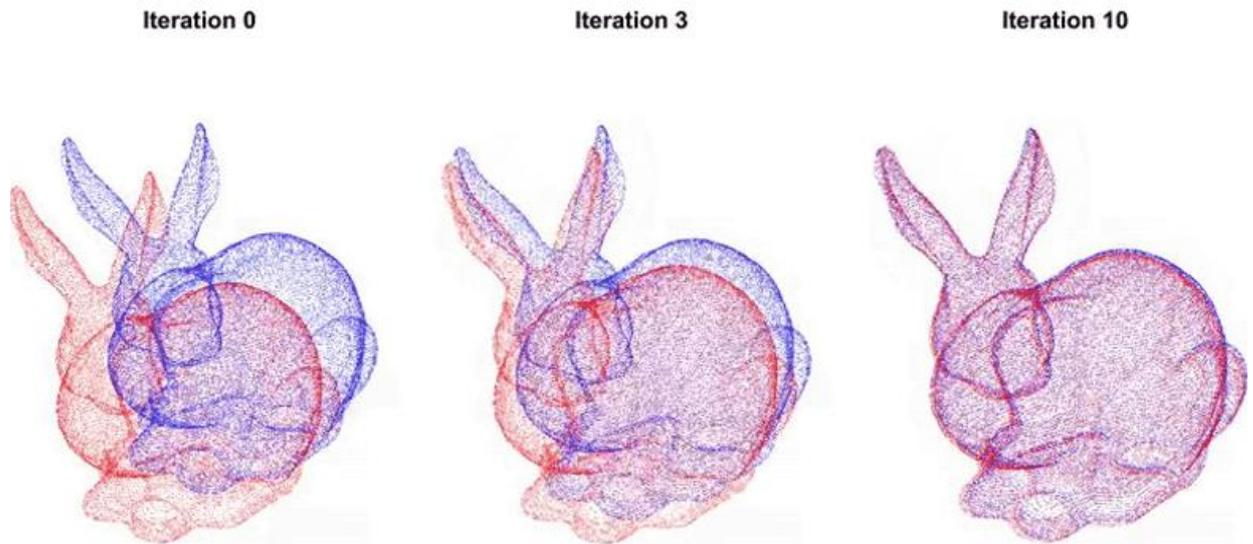


Рисунок 10. Итерации алгоритма в 3D

Постановка задачи:

Даны два облака точек:  $Q = \{q_1, \dots, q_i, \dots, q_n\}$  и  $P = \{p_1, \dots, p_j, \dots, p_m\}$  и между ними существуют соответствия  $C = \{(i, j)\}$ , которые нам на данный момент не известны [4]. Необходимо получить преобразование (матрицу поворота  $R$  и вектора переноса  $t$ ) с минимальной суммой квадратов ошибок:

$$\varepsilon = \sum_{(i,j) \in C} C \|q_i - R p_j - t\|^2$$

Далее на рисунке 11 проиллюстрировано, как уменьшается ошибка (расстояние) между соответствующими точками (они соединены отрезками).

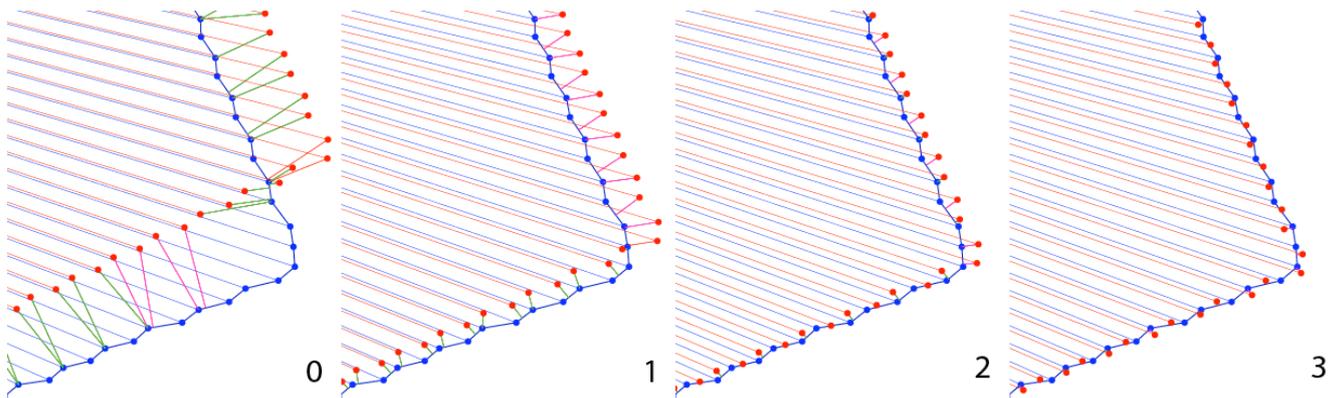


Рисунок 11. Итерации алгоритма в 2D

Если известно точное соответствие точек  $C$ , то правильное преобразование может быть найдено точно. Для этого только необходимо решить уравнение вида  $P' = RP + t$  и найти  $P$ .

Итерация алгоритма:

1. Связка точек. На этом этапе происходит выбор соответствий между точками двух облаков точек. Стоит обратить внимание, что у одной точки может как не быть соответствий, так и быть более 1.
2. Поиск преобразования. Для каждой точки составляется уравнение вида  $P' = RP + t$ , а затем эта система уравнений решается методом наименьших квадратов.
3. Оценка параметров преобразования с помощью вычисления суммы квадратов ошибок.
4. Преобразования точек с помощью оценочных параметров [1].

Критерием остановки алгоритма может быть как максимальное количество итераций, так и некоторое минимальное значение ошибки  $\varepsilon$ .

В качестве первого приближения можно совместить центры масс облаков точек. Тогда для каждого облака считается центр масс:

$$\mu_Q = \frac{1}{|C|} \sum_{(i,j) \in C} q_i$$

$$\mu_P = \frac{1}{|C|} \sum_{(i,j) \in C} p_j$$

Затем оба облака параллельно переносятся так, чтобы их центры масс оказались в начале координат (или же просто чтобы они совпали):

$$Q' = \{q_i - \mu_Q\}$$

$$P' = \{p_j - \mu_P\}$$

На рисунке 12 проиллюстрированы этапы регистрации облаков точек: сначала представлены исходные данные, затем совмещение центров облаков точек и после результат итераций алгоритма ICP.

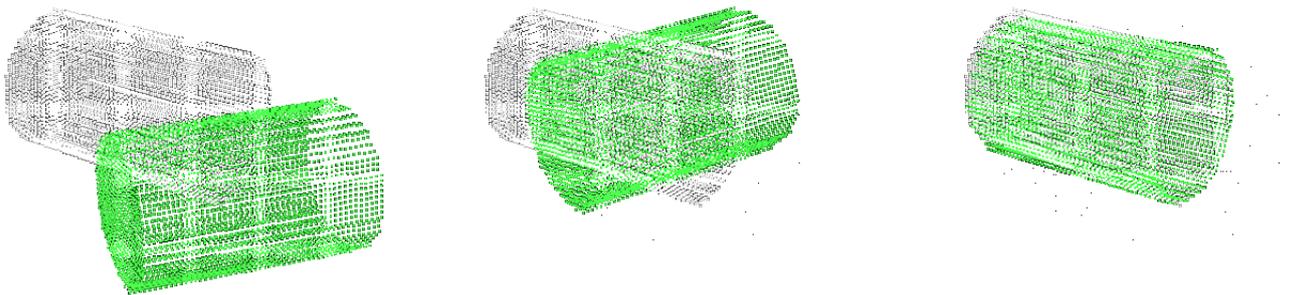


Рисунок 12. Совмещение облаков точек и итерации алгоритма

Поиск соответствий. В классической версии алгоритма точки связывают по критерию ближайшего соседа. Однако, существует множество модификаций, которые позволяют использовать другие способы связки точек:

- Выбрать все точки;
- Единая подвыборка;
- Случайная выборка;
- Выборка на основе признаков (цвет, кривизна и т.д.).

Существует много вариантов алгоритма ICP [10], из которых наиболее популярны *point-to-point* и *point-to-plane*. Последний более эффективен в структурированных средах [11][12]. В библиотеке *open3d* реализованы оба варианта алгоритма, однако в итоговой программе используется *point-to-point*, потому что основная цель – регистрация облаков точек реального мира, а не пространств, где часто бывает большое количество плоских поверхностей (пол, стены, потолок, мебель и так далее).

Однако, данный алгоритм может быть неэффективен в случае, если облака точек сильно сдвинуты друг относительно друга, также данный алгоритм уязвим к локальным минимумам и хорошо работает только при близком к правильному решению начальном предположении о параметрах преобразования [1].

### 2.1.2 По позициям датчиков ARKit

Для Apple Lidar существует специальное программное обеспечение, которое позволяет отслеживать мировые координаты камеры. Данная технология является закрытой, однако известен принцип ее работы: во время сессии сканирования с помощью датчиков рассчитывается перемещение камеры относительно “якоря” - позиции начала сессии [3]. Таким образом, зная позиции камеры для каждого кадра, можно восстановить объект.

На рисунке 13 проиллюстрировано, как располагается *связанная система координат* – подвижная система координат, с тремя осями: нормальной, продольной, поперечной, фиксированными относительно устройства.

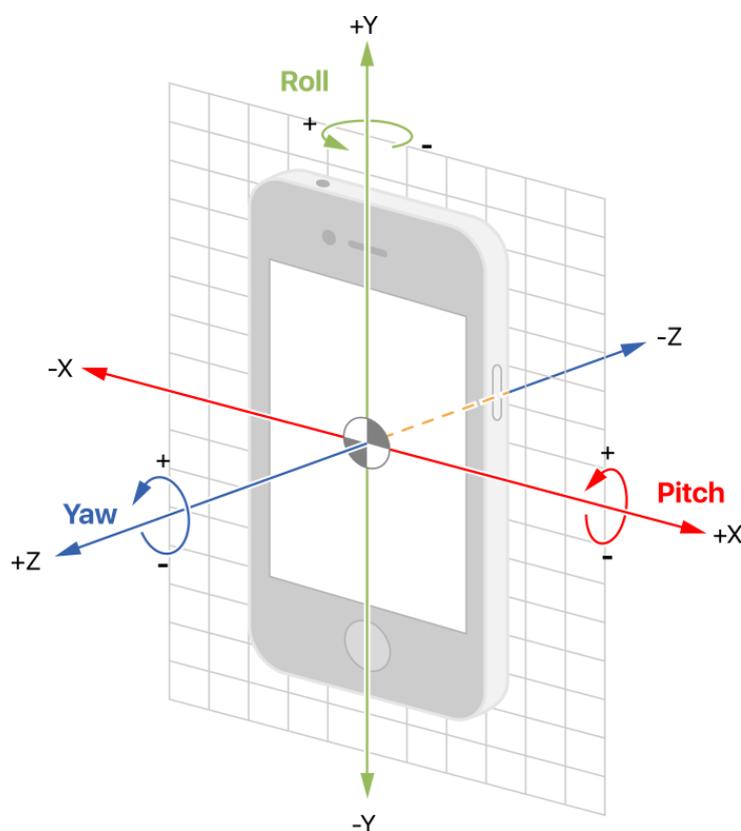


Рисунок 13. Связанная система координат (Aircraft principal axes)

### 2.1.3 Консенсус случайной выборки

Консенсус случайной выборки или RANSAC – это итерационный метод оценки параметров модели на основе случайных выборок. Данный метод является устойчивым к зашумленности исходных данных. RANSAC использует подход повторной случайной подвыборки [8].

Постановка задачи аналогична приведенной выше для итеративного алгоритма ближайших точек. И результатом алгоритма также является аффинное преобразования вида  $[R | t]$ , где  $R$  – матрица поворота и  $t$  – вектора переноса.

Итерация алгоритма:

1. Случайным образом выбирает минимальный набор точек (2D — 2, 3D — 3) в одном облаке.
2. Находятся соответствующие точки в другом облаке (FPFH - Fast Point Feature Histograms).
3. Определяет параметры преобразования.
4. Если исходное и преобразованное изображение совпали в достаточной степени, то результат принимается, иначе процесс повторяется, т.е. в конце цикла работы алгоритма принимается гипотеза, которая дает наименьшую ошибку [2].

На рисунке 14 можно увидеть несколько итераций алгоритма на примере.

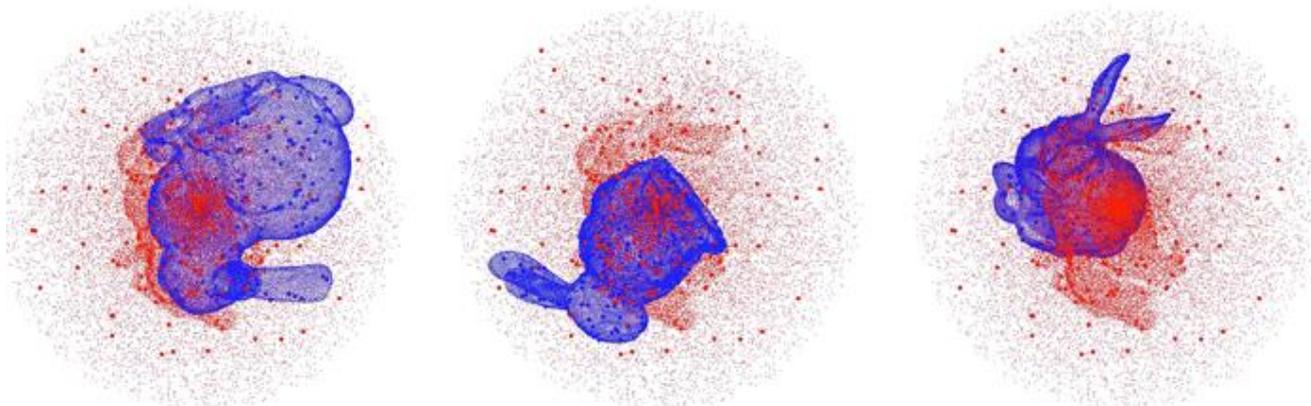


Рисунок 14. Итерации алгоритма в 3D

Интересной особенностью данного метода является то, что верхняя граница времени работы алгоритма отсутствует, соответственно при увеличении количества проведенных итераций увеличивается вероятность нахождения точного решения [9].

## 2.2 Полная модель

При обходе вокруг объекта в модели как минимум одна грань будет не видна (место опоры объекта), соответственно в этой области будет “дыра”. Для того чтобы получить “полную модель, объект поворачивается на другую сторону и сканируется еще раз. Таким образом, сняв несколько наборов данных, а затем проведя процедуру регистрации каждого из наборов, получается несколько облаков точек одного и того же объекта. Далее необходимо соединить эти части воедино, чтобы получить полную модель.

Для того, чтобы получить преобразование для совмещения двух частей объекта, которые представлены облаками точек, проводится несколько итераций алгоритма RANSAC, а затем процедура регистрации посредством алгоритма ICP.

Ниже представлен псевдокод алгоритма построения полной модели.

```
result.add(scans[0])
matrix = identity_matrix
for (i = 0...scans.size - 1)
    scans[i+1] = matrix * scans[i+1]
    ransac_matrix = RANSAC (scans[i], scans[i+1], ransac_max_iterations);
    scans[i+1] = ransac_matrix * scans[i+1]
    matrix = ransac_matrix * matrix
    icp_matrix = ICP (scans[i], scans[i+1], icp_max_iterations);
    scans[i+1] = icp_matrix * scans[i+1]
    matrix = icp_matrix * matrix
    result.add(scans[i+1])
return result
```

Далее приведен пример получения полного облака точек (см. рис. 15): на рис. 15а представлены три облака точек объекта, раскрашенные в разные цвета, на рис. 15б результирующее облако точек, полученное совмещением этих трех облаков с помощью последовательности алгоритмов, приведенной выше.

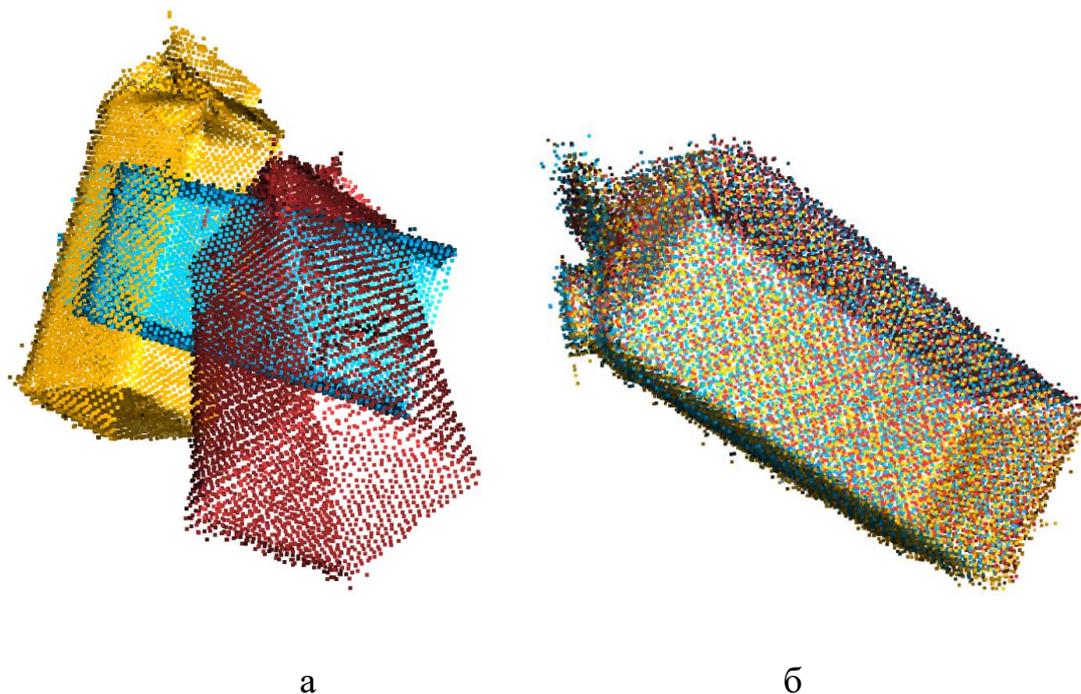


Рисунок 15. Совмещение облаков точек объекта «тетрапак»

Далее на рисунке 16 представлено полное облако точек объекта «тетрапак» с учетом цветовой информации.

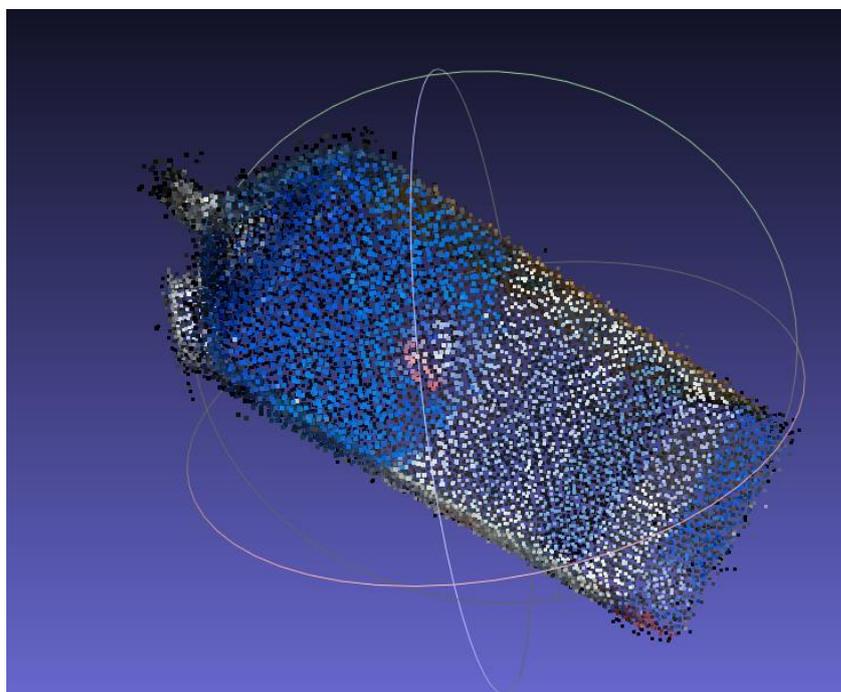


Рисунок 16. Цветное облако точек объекта «тетрапак»

### 2.3 Постобработка облака точек

После успешного построения полного облака, происходит построение триангуляционной сети (меша) с помощью `open3d` – библиотеки с открытым исходным кодом для разработки программного обеспечения, работающего с 3D-данными [6].

Затем проводится операция текстурирования с помощью сторонней библиотеки `mvs-texturing`. Для этого необходимы RGB-кадры и позиции камеры, соответствующие этим кадрам. Для успешного текстурирования необязательно передавать набор RGB-кадров, эффективнее выбрать самые удачные, например, такие, где объект находится в фокусе. Но также важно следить за тем, чтобы было полное покрытие объекта текстурами, т.е. не было таких ракурсов, где текстуры отсутствуют.

На рисунке 17 проиллюстрирован пример готовой модели.



Рисунок 17. Пример готовой модели объекта «ботинок»

### 2.4 Сравнение моделей с разных устройств

В данной работе предполагается получение исходных данных посредством камер и датчиков устройства Apple iPhone 12 Pro, однако для каждой пары камеры и датчика глубины необходим отдельный способ для построения полной модели. Для построения неполных облаков точек для

данных с передней камеры используется алгоритм ICP, а для задней – специальное программное обеспечение ARKit.

В случае передней RGB-камеры Apple iPhone 12 Pro и датчика TrueDepth для получения облаков точек используется алгоритм ICP, т.к. этот датчик имеет более высокую точность в связи с тем, что основной его задачей является распознавание человеческого лица (см. таблицу 2).

Однако, у метода ICP есть некоторые ограничения, такие как невозможность построения симметричного относительно оси вращения объекта, т.е. построение цилиндра или шара не представляется возможным без задействования объектов окружения, если такие имеются. Из описания алгоритма выше известно, что первым шагом итерации данного алгоритма производится поиск соответствий на двух облаках точек, а затем сводит к минимуму ошибку между ними, но если облака точек практически идентичны, то их совмещение нарушит геометрию объекта. Выходом из такой ситуации может быть поиск соответствий с использованием цветовой информации точек (есть вероятность, что текстура объекта повлияет на корректность соответствий точек), однако в данном случае в паре с этим датчиком идет передняя камера, которая заведомо хуже задней. Из этого можно сделать вывод, что сходимость данного метода зависит от геометрии сканируемого объекта.

В случае задней RGB-камеры Apple iPhone 12 Pro и датчика Lidar для получения облаков точек используется отслеживание мировых координат с помощью датчиков ARKit. Таким образом, для данного способа геометрические особенности объекта никак не влияют на построение неполных моделей, однако разрешение датчика маленькое, поэтому детализация цифровой копии объекта будет сильно уступать реальному прототипу, а также получение цифровой копии маленьких объектов не представляется возможным. Но данный способ является менее затратным с точки зрения времени работы и ресурсов устройства, на котором производятся вычисления, соответственно он будет работать быстрее, чем покадровая регистрация облаков точек с помощью итеративного алгоритма ближайших точек как в первом случае. А также благодаря большому разрешению задней RGB-камеры у моделей будет высокое качество текстур.

Из выше написанного можно сделать следующий сравнительный вывод для получения неполных объектов, представленный в виде таблицы (см. таблицу 3).

Рассматриваемая характеристика	Задняя камера и Apple <u>Lidar</u>	Передняя камера и Apple TrueDepth
Размеры снимаемого объекта	-	+
Геометрия объекта	-	+
Детализация объекта (точность передачи)	-	+
Качество текстур	+	-
Потребление ресурсов алгоритмами регистрации	+	-
Удобство процесса съемки для конечного пользователя	+	-

Таблица 3. Сравнение способов получения исходных данных

Далее приведены две модели, которые были получены двумя рассматриваемыми способами (см. рис. 18). На изображениях видно, что те же особенности, которые были характерны для неполных моделей прослеживаются и здесь, соответственно можно сделать аналогичные выводы, а именно геометрические особенности, качество текстур и тд.



а



б

Рисунок 18. а – полная модель, полученная посредством задней камеры и сканера Apple Lidar, б – полная модель, полученная посредством передней камеры и сканера Apple TrueDepth

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были проведены практические исследования, результатом которых является разработанное приложение на устройстве Apple iPhone 12 Pro, а также более новые устройства этой серии данного производителя, при поддержке компании InData Labs. Приложение можно найти в магазине приложений App Store под названием Smart 3D Scan.

Данное приложение для пространственного сканирования с помощью съемки объектов реального мира позволит получить полные модели, что является его отличительной особенностью среди подобных программ для пространственного сканирования.

В ходе работы были изучены алгоритмы такие алгоритмы регистрации облаков точек, как:

- Итеративный алгоритм ближайших точек (ICP)
- Регистрация по позициям датчиков (ARKit)
- Консенсус случайной выборки (RANSAC)

Изучены новые технологии:

- open3d – библиотека с открытым исходным кодом для разработки программного обеспечения, работающего с 3D-данными [6].
- mvs-texturing – библиотека для комплексного структурного текстурирования крупномасштабных реальных 3D-реконструкций. [7].

На данном этапе полученное приложение решение не несет в себе практической ценности, а только демонстрирует технологию получения замкнутых полигональных пространственных моделей, однако накопленные во время данных исследований знания могут быть применены для новых проектов в сферах медицины, трехмерного печатания, компьютерной графики и так далее, и также элементы этого приложения могут быть применены в будущих проектах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Zhengyou Z. Iterative Point Matching for Registration of Free-form Curves / Z. Zhengyou: International journal of computer vision, 1994. – 119-152 с.
2. Fischler, M.A. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography / M. A. Fischler, R. C. Bolles: Communications of the ACM, 1981. – 59 с.
3. Apple Development Documentation, Understanding World Tracking [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые дан., 2020. – Режим доступа: [https://developer.apple.com/documentation/arkit/configuration\\_objects/understanding\\_world\\_tracking](https://developer.apple.com/documentation/arkit/configuration_objects/understanding_world_tracking), свободный.
4. Bennewitz, M. Introduction to Mobile Robotics. Iterative Closest Point Algorithm [Электронный ресурс] / M. Bennewitz. – Электрон. текстовые дан., 2015. – Режим доступа: <https://cs.gmu.edu/~kosecka/cs685/cs685-icp.pdf>, свободный.
5. Simek, K. Dissecting the Camera Matrix, Part 3: The Intrinsic Matrix [Электронный ресурс] / К. Simek. Электрон. текстовые дан., 2013. – Режим доступа: <http://ksimek.github.io/2013/08/13/intrinsic/>, свободный.
6. Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые дан., 2018. – Режим доступа: <http://www.open3d.org/docs/release/index.html>, свободный.
7. Waechter M., Moehrle N. and Goesele M. Let There Be Color! Large-Scale Texturing of 3D Reconstructions / Waechter, M., Moehrle, N., Goesele, M: ECCV, 2014.
8. Cantzler, H. Random sample consensus (ransac) / H. Cantzler: Institute for Perception, Action and Behaviour, Division of Informatics, University of Edinburgh, 1981.
9. Huber P.J. Robust Statistics / P. Huber: Wiley, 1981. – 1 с.
10. François, P., Francis, C. A Review of Point Cloud Registration Algorithms for Mobile Robotics / P. François, C. Francis: Foundations and Trends in Robotics, 2004. – 104 с.
11. Kok-Lim L. Linear Least-Squares Optimization for Point-to-Plane ICP Surface Registration / L. Kok-Lim: Technical Report TR04-004, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, 2004.
12. François, P., Francis, C. Comparing ICP Variants on Real-World Data Sets / P. François, C. Francis: In Autonomous Robots, 2013. – 133–148 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Пример неудачной регистрации облаков точек объекта «корзинка» (см. рис. 19), сильное расхождение облаков.

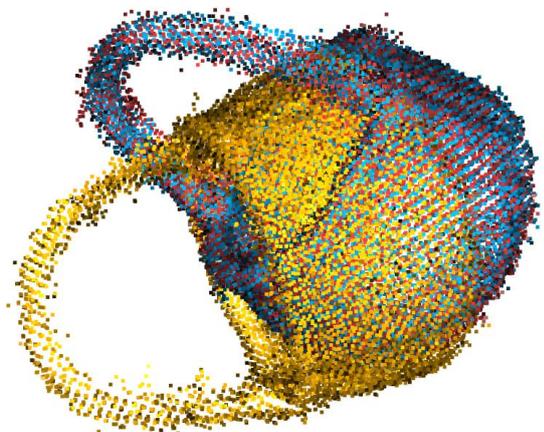


Рисунок 19. Неудачная регистрация объекта «корзинка»

Еще один пример неудачной регистрации облаков точек объекта «корзинка» (см. рис. 20), однако в данном случае заметно расхождение другого плана: расхождение в области ручки объекта «корзинка», т.к. большая часть точек приходится на другую часть объекта, которая является симметричной относительно оси.

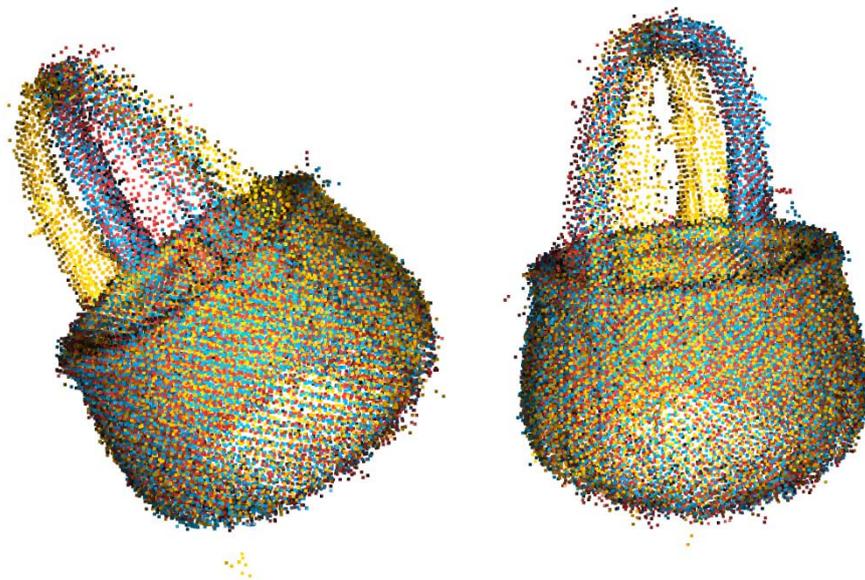


Рисунок 20. Неудачная регистрация объекта «корзинка»

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Расположение траектории перемещения камеры относительно объекта «чемодан» (см. рис. 21, 22).

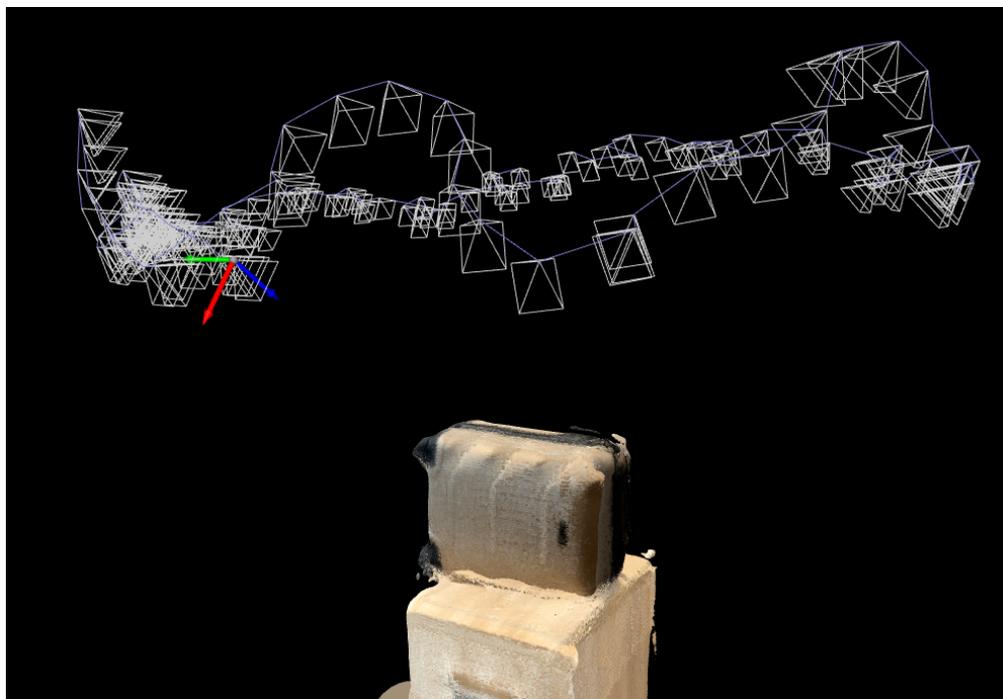


Рисунок 21. Объект «чемодан» в позиции лежа

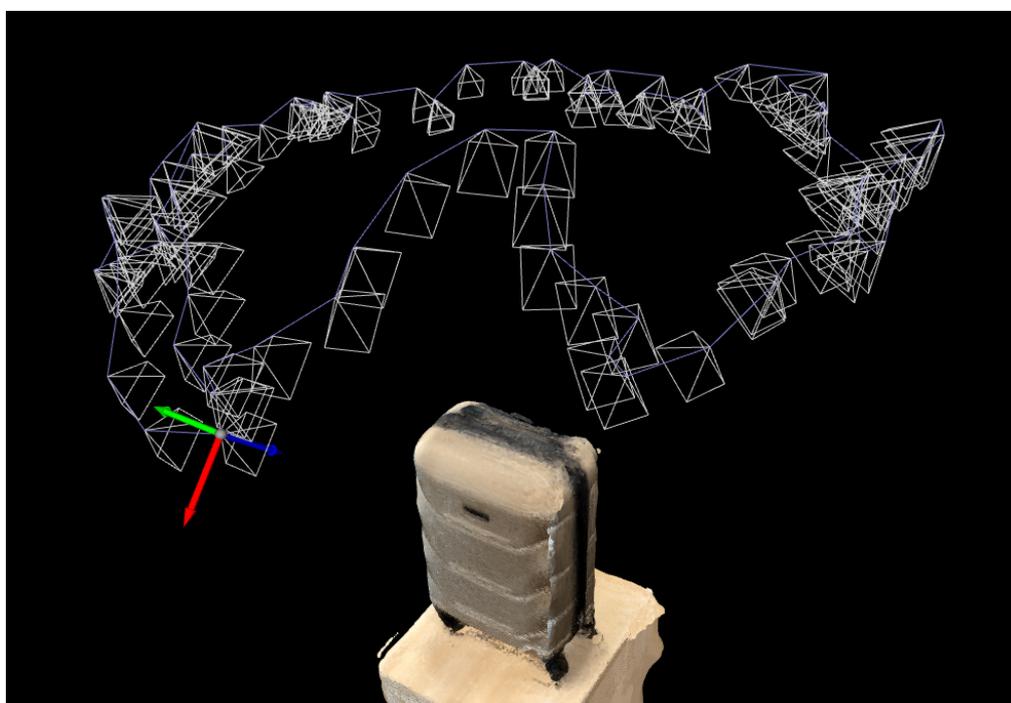


Рисунок 22. Объект «чемодан» в позиции стоя

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Интернет-издание [3d-scanners.ireviews.com](http://3d-scanners.ireviews.com) в 2015 году представило список лучших 3D-сканеров в нескольких ценовых категориях. На рисунках 23, 24, 25, 26 приведены скриншоты.

Read Reviews:	 Faro	 NextEngine	 Aicon	 3D Digital Corp	 ShapeGrabber
	#1	#2	#3	#4	#5
<b>REVIEWS, PRICE AND ABOUT</b>					
Customer Reviews	FARO FOCUS 3D X130 ★★★★★	NEXTENGINE 3D SCANNER HD ★★★★★	AICON BREUCKMANN D-STATION ★★★★★	3D DIGITAL CORP ESCAN3D ★★★★★	SHAPEGRABBER LM600 ★★★★★
Model	Focus 3D X130	3D Scanner HD	Breuckmann d-STATION	eScan3D	LM600
Price	Contact	\$2,995	Contact	\$7,795	Contact
Competitive Edge	Most Versatile	Coollest Design	Most Accurate	Fastest Scans	Best Value
Product webpage	<a href="#">Faro</a>	<a href="#">NextEngine</a>	<a href="#">Aicon</a>	<a href="#">3D Digital Corp</a>	<a href="#">ShapeGrabber</a>
<b>FEATURES</b>					
Size (cm)	24 x 20 x 10	22.4 x 9.1 x 27.7	38 x 38 x 35	21 x 24 x 12	79 x 40 x 49
Type	Tripod Mounted	Tabletop	Tabletop	Tripod Mounted	Stand Mounted
Software	All Standard Formats	STL, OBJ, VRML, XYZ, PLY	BRE, STL, PLY, VRML, ASC	STL, OBJ, ASCII	3PI, PIF, XYZ, GPD
Scan Distance or Volume	130 meters	34.3 x 25.7 x 25.7 cm	17 cm	600 x 400 x 400 cm	60 x 17.5 x 19 cm
View Field	300 deg H, 360 deg V	90 deg H, 90 deg V	360 deg.	N/A	N/A

Рисунок 23. Лучшие 3D-сканеры в ценовой категории до 10,000\$.

Read Reviews:					
	Artec	Nikon	Faro	Creaform	LMI Technologies
	#1	#2	#3	#4	#5
<b>REVIEWS, PRICE AND ABOUT</b>					
Customer Reviews	ARTEC EVA ★★★★★	NIKON MODELMAKER MMCX ★★★★★	FARO FOCUS 3D X330 ★★★★★	CREAFORM HANDYSCAN 300 ★★★★★	LMI TECHNOLOGIES HDI 120 ★★★★★
Model	Eva	ModelMaker MMCx	Focus 3D X330	HandySCAN 300	HDI 120
Price	\$19,800	\$25,620	Contact	\$42,900	Contact
Competitive Edge	Best Value	Most Popular	Most Versatile	Most Accurate	Best Performance
Product webpage	<a href="#">Artec</a>	<a href="#">Nikon</a>	<a href="#">Faro</a>	<a href="#">Creaform3d</a>	<a href="#">LMI Technologies</a>
<b>FEATURES</b>					
Size (cm)	26.2 x 15.8 x 6.4	N/A	N/A	12.2x7.7x29.4	27.6 x 4.9 x 7.4
Type	Handheld	Handheld	Tripod Mounted	Handheld	Tripod Mounted
Software	.OBJ, .PLY, .WRL, .STL, .AOP, .ASCII, .PTX, .E57, .XYZRGB	.IGEX, .STL, .CATIA, .UG, .PRO-E, .STEP, .VDA	All Standard Formats	.DAE, .FBX, .MA, .OBJ, .PLY, .STL, .TXT, .WRL, .X3D, X3DZ, .ZPR	PLY, OBJ, STL, ASC, FBX, 3D3
Scan Distance or Volume	1 meter	50mm	330 meters	225mm	300mm
View Field	30 deg H 21 deg V	N/A	300 deg H, 360 deg V	250mm	45 degrees

Рисунок 24. Лучшие 3D-сканеры в ценовой категории до 50,000\$.

Read Reviews:	 Creaform	 Nikon	 GOM	 ShapeGrabber	 eQUALITY TECH
	#1	#2	#3	#4	#5
<b>REVIEWS, PRICE AND ABOUT</b>					
Customer Reviews	CREAFORM HANDYSCAN 700 ★★★★★	NIKON XC65DX ★★★★☆	GOM ATOS TRIPLE SCAN 12M ★★★★☆	SHAPEGRABBER AI810 ★★★★☆	EQUALITY TECH REXCAN CS+ ★★★★☆
Model	HandySCAN 700	XC65Dx	ATOS Triple Scan 12M	Ai810	Rexcan CS+
Price	\$56,900	\$74,000	\$330,000	Contact	\$58,900
Competitive Edge	Best Value	Most Stylish	Most Precise	Biggest Scans	Most Versatile
Product webpage	<a href="#">Creaform</a>	<a href="#">Nikon</a>	<a href="#">Gom</a>	<a href="#">ShapeGrabber</a>	<a href="#">Eqtime</a>
<b>FEATURES</b>					
Size (cm)	12.2x7.7x29.4	15.5x8.6x14.2	N/A	1.91 x 0.92 x 2.21 meters	30x80x90
Type	Handheld	Robotic Arm Based	Robotic Arm Based	Floor Model	Desktop
Software	.DAE, .FBX, .MA, .OBJ, .PLY, .STL, .TXT, .WRL, .X3D, .X3DZ, .ZPR	.IGEX, .STL, .CATIA, .UG, .PRO-E, .STEP, .VDA	.DAE, .FBX, .MA, .OBJ, .PLY, .STL, .TXT, .WRL, .X3D, .X3DZ, .ZPR	3PI, PIF, XYZ, GPD	.STL
Scan Distance or Volume	225mm	75mm	490mm	80 x 125 cm	100mm
View Field	250mm	65mm	2000mm	360 deg.	100mm

Рисунок 25. Лучшие 3D-сканеры в ценовой категории более чем за 50,000\$.

#1	#2	#3	#4	#5
				
AUTHOR RATE ★★★★★	AUTHOR RATE ★★★★☆	AUTHOR RATE ★★★★☆	AUTHOR RATE ★★★★☆	AUTHOR RATE ★★★★☆
<b>EinScan-S</b>	<b>Fuel 3D Scanify</b>	<b>MakerBot Digitizer</b>	<b>Da Vinci 1.0 Pro 3in1</b>	<b>iSense</b>
<a href="#">Visit Store</a>	<a href="#">Visit Store</a>	<a href="#">Visit Store</a>	<a href="#">Visit Store</a>	<a href="#">Visit Store</a>
<b>Price</b> \$999	<b>Price</b> \$1,500	<b>Price</b> \$799	<b>Price</b> \$744.57	<b>Price</b> \$99
<b>Dimensions:</b> 9.67 x 10.24 x 2.56 in	<b>Dimensions:</b> 10 x 9.6 x 1.3 in	<b>Dimensions:</b> 47.5 x 20.3 x 41.1 cm	<b>Dimensions:</b> 18.4 x 20 x 22 in	<b>Dimensions:</b> 11.9 x 2.8 x 2.9 cm
<b>Scanning Technology:</b> Structured Light Scanning	<b>Scanning Technology:</b> Fusion of Stereoscopic & Photometric Data	<b>Scanning Technology:</b> MakerBot Multi- Scan Technology	<b>Scanning Technology:</b> Slit Laser Triangulation	<b>Scanning Technology:</b> Structured Light Scanning
<b>Achievable Resolution:</b> 0.1mm	<b>Achievable Resolution:</b> 0.35mm	<b>Achievable Resolution:</b> 0.5mm	<b>Achievable Resolution:</b> 0.25mm	<b>Achievable Resolution:</b> 0.635mm
<b>Max Scan Volume:</b> 700 x 700 x 700mm (2.3-foot cube)	<b>Max Scan Volume:</b> 210 x 300 x 400mm (8" x 12" x 16")	<b>Max Scan Volume:</b> 20.3 x 20.3cm (8 x 8 in.)	<b>Max Scan Volume:</b> 3 x 3 - 15 x 15cm (1.18 x 1.18"- 5.9 x 5.9")	<b>Max Scan Volume:</b> 8 x 118in

Рисунок 26. Лучшие 3D-сканеры в ценовой категории до 1,500\$.