

ՀՀ ԳԱԱ ԻՆՖՈՐՄԱՏԻԿԱՅԻ ԵՎ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՄԱՆ ՊՐՈԲԼԵՄՆԵՐԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Գևորգյան Արամ Վլադիմիրի

ԵՐԿԱՓ ԹՎԱՅԻՆ ՊԱՏԿԵՐՆԵՐԻՑ ԵՌԱԶԱՓ ՕԲՅԵԿՏԻ ՍԻՆԹԵԶԱՆ
ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄ ԵՎ ԻՐԱԿԱՆԱՑՈՒՄ

Ե.13.04 «Հաշվողական մեքենաների, համալիրների, համակարգերի և ցանցերի
մաթեմատիկական և ծրագրային ապահովում» մասնագիտությամբ տեխնիկական
գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան – 2019

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ИНФОРМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ НАН РА

Геворкян Арам Владимирович

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ СИНТЕЗА ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ ИЗ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ДВУМЕРНЫХ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности

05.13.04 - “Математическое и программное обеспечение вычислительных машин,
комплексов, систем и сетей”

Եреван – 2019

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայ-Ռուսական համասարանում

Գիտական դեկավար՝ ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր Հ. Գ. Սարովիսանյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ֆիզ.մաթ.գիտ. դոկտոր Մ.Ե.Հարությոնյան
տեխ.գիտ.թեկնածու Մ.Ղ.Գյուղօյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան

Պաշտպանությունը կայանալու է 2019թ. Մայիսի 7-ին ՀՀ ԳԱԱ հնֆորմատիկայի և ավտոմատացման պրոբլեմների ինստիտուտում գործող 037 «հնֆորմատիկա» մասնագիտական խորհրդի նիստում հետևյալ հասելով՝ Երևան, Պ. Սևակի 1:

Աստենախոսությանը կարելի է ծանրությանը <<ԳԱԱ ԻԱՊԻ գրադարանում:
Սեղմագիրը առաքված է մարտի 28-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար, ֆիզ.մաթ.գիտ.դոկտոր

Հ. Գ. Սարուխանյան

Тема диссертации утверждена в Российско-Армянском университете

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук А.Г.Саруханян

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук М.Е.Арутюнян
кандидат тех. наук М.К.Гюрджян

Ведущая организация: Национальный политехнический университет Армении

Защита состоится 7-го мая 2019г. в 17:00 на заседании специализированного совета 037 «Информатика» Института проблем информатики и автоматизации НАН РА по адресу: 0014, г. Ереван, ул. П. Севака 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПИА НАН РА.
Автореферат разослан 28-го марта 2019г.

Ученый секретарь специализированного совета, доктор физ. - мат. наук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время активно развиваются трехмерные технологии, которые проникли почти во все отрасли нашей жизни. Они используются в киноиндустрии, видео и компьютерных играх, приложениях виртуальной реальности, робототехнике, геоинформационных системах, биометрии, медицине, археологии, военном деле и т.д. Одной из основных задач в данной области является создание трехмерной модели реального объекта, которая имеет множество применений и очень актуальна. Данная задача также известна, как задача обратной инженерии.

Создание 3D модели происходит при помощи 3D сканирования. 3D сканер - это устройство, предназначенное для получения трехмерной информации окружающего мира. 3D сканеры разделяются на два типа: контактные и бесконтактные. Контактным 3D сканерам для получения трехмерной информации необходим физический контакт с объектом. Бесконтактные 3D сканеры используют активные или пассивные методы. Активные методы излучают на исследуемый объект направленные волны, а пассивные анализируют отраженное окружающее излучение. Результатом большинства 3D сканеров является облако точек. Облако точек - это множество точек в некой координатной системе.

Большинство 3D сканеров требуют дорогостоящего оборудования, чувствительны к окружающей среде, освещению и свойствам материалов, из которых сделаны поверхности объектов.

Более доступного решения задачи построения 3D модели объекта можно достичь если использовать стереозрение. Стереозрение является пассивным методом 3D сканирования, который позволяет получить трехмерную информацию при помощи двух камер. Однако для получения 3D модели объекта при помощи стереозрения, необходимо решить задачу совмещения различных ракурсов объекта.

Полученная 3D модель имеет множество применений, одним из которых является 3D печать. 3D принтеры активно развиваются начиная с 2000-ых годов и очень актуальны в наше время.

Цель работы: разработать метод построения трехмерной модели физического объекта при помощи двух камер. На основе разработанного метода реализовать программный комплекс. Данный комплекс должен совмещать методы стереозрения с алгоритмами, работающими с трехмерными данными, решать задачи калибровки камер, стерео сопоставления, построения облака точек, регистрации (совмещения) облаков точек и восстановления поверхности.

Методы исследования

В работе используются методы калибровки камер, ректификации стереоизображений, стерео соответствие (построения карты смещений), обработки и фильтрации облаков точек, регистрации облаков точек и восстановления поверхности.

Научная новизна

В диссертационной работе получены следующие результаты:

- Разработан метод регистрации облаков точек, который основан на алгоритмах регистрации при помощи FPFH (Fast Point Feature Histograms) дескриптора и ICP (Iterative Closest Point).
- На основе алгоритмов стереозрения и метода регистрации облаков точек, разработан метод создания 3D модели объекта при помощи двух камер.
- Разработан программный комплекс, который совмещая предложенные методы с известными алгоритмами позволяет получить 3D модель объекта.

Практическая ценность

На основе полученных результатов разработан программный комплекс, который, используя две обычные веб-камеры, позволяет получить трехмерную модель реального объекта. Полученная 3D модель может быть использована в приложениях 3D графики или быть распечатана при помощи 3D принтера.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод регистрации облаков точек, который сначала обрабатывает облака точек (удаляет шумы, вычисляет нормали) и потом для соединения облаков точек использует алгоритм регистрации на основе FPFH дескриптора и ICP алгоритм.
2. Метод получения 3D модели объекта при помощи стереозрения. Данный метод, комбинируя алгоритмы стереозрения с разработанным алгоритмом регистрации облаков точек, получает трехмерную модель объекта.
3. Программный комплекс, который на основе разработанных алгоритмов позволяет получить 3D модель объекта.

Апробация

Основные результаты и положения диссертационной работы обсуждались и докладывались на семинарах Российско-Армянского Славянского университета и Института проблем информатики и автоматизации НАН РА, представлялись на международной конференции по информационным технологиям и разработки программного обеспечения ИТА 2016 в г. Варна, Болгария и на международной конференции «Применение современных научных методов и технологий в области экспертиз» г. Ереван-Цахкадзор, Армения, 2015.

Внедрение результатов работы

Программный комплекс внедрен и используется компанией "BARVA" для получения 3D модели.

Публикации

Результаты работы отражены в шести публикациях, список которых приведен в конце авторефера.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Основной текст изложен на 105 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **введении** обоснована актуальность работы и практическая значимость темы диссертационной работы, кратко изложено состояние предметной области, сформулированы цели и основные задачи исследования, выделены научные результаты, отличающиеся новизной, положения, выносимые на защиту, и приведена практическая ценность полученных результатов. Даётся краткий обзор работы.

В **главе 1** рассматриваются активные и пассивные методы получения трехмерной информации. Активные методы сканирования дают точный результат, но они также требуют дорогостоящего оборудования и чувствительны к свойствам материалов, из которых сделаны поверхности объектов. Недостатками же пассивных методов является то, что они больше зависят от световых излучений и требуют больших вычислительных затрат.

К пассивным методам сканирования относится стереозрение. Стереозрение - это

технология, позволяющая при помощи двух или более камер получить расстояние объектов до камеры (карту глубины). Традиционное стереозрение использует две камеры, что похоже на эффект бинокулярного зрения - это человеческая способность видеть предмет объемно, при помощи левого и правого глаза. Пара изображений, полученных левой и правой камерой, называется стереопарой или стереоизображениям. Главная идея заключается в нахождении соответствующих точек в левом и правом изображении, вычислении разницы их координат - построение карты смещений (*disparity map*), и на основе этой разницы вычислении карты глубины (*depth map*). Построение карты глубины в основном состоит из следующих этапов: калибровка, ректификация, стерео соответствие, триангуляция.

Калибровка камеры - это процесс вычисления внешних и внутренних параметров камеры по имеющимся фотографиям или видео, снятыми данной камерой. Внутренние параметры содержат такие данные, как фокусное расстояние, размер пикселя, координаты принципиальной точки и коэффициент дисторсии. Внешние параметры показывают позицию и ориентацию камеры в пространстве. Стерео калибровка камер - это нахождение внутренних параметров каждой из двух камер, а также как камеры геометрически расположены по отношению друг к другу. Одним из наиболее популярных и используемых методов калибровки камер является метод *Zhang*¹, который калибрует камеру при помощи калибровочного объекта, в частности, шахматной доски.

Ректификация - это процесс проектирования изображений на плоскость, параллельную линии, соединяющей центры объективов двух камер (базовая линия). После ректификации изображения левой и правой камеры имеют одинаковую плоскость, а соответствующие точки левых и правых изображений будут находиться на одной строке. Тем самым облегчается задача стерео соответствия.

Стерео соответствие - это задача поиска одинаковых пикселей в левом и правом изображениях камер, которым соответствует одна и та же точка в трехмерном пространстве. Пусть (x_1, y_1) и (x_2, y_2) - координаты точки в левом и правом изображениях. Если изображения ректифицированы, то соответствующие точки находятся на одной строке, то есть $y_1 = y_2$. Разность $x_2 - x_1$ называется смещением или диспаритетом. Целью алгоритмов стерео соответствия является построение карты смещений. На рисунке 1 показаны соответствующие точки двух изображений, а на рисунке 2 - построенная по ним карта смещений.

¹ Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, pp. 1330–1334, 2000.



Рисунок 1: Соответствующие точки на левом и правом изображениях.

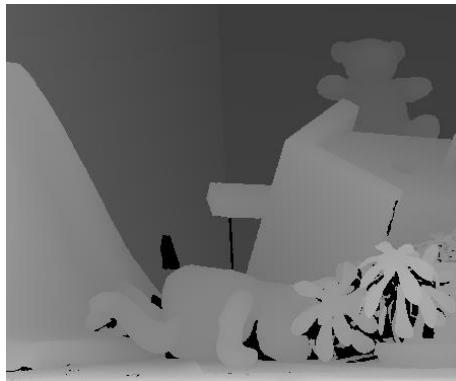


Рисунок 2: Карта смещений.

Задача стерео соответствия осложняется некоторыми фактами:

- Шум: из-за не совершенности сенсоров, а также плохого освещения, на фотографиях может присутствовать шум.
- Однотонные области: когда на изображениях присутствуют однотонные области, трудно определить правильный соответствующий пиксель.
- Заслоненные области: некоторые пиксели могут присутствовать только на одном из изображений, этим пикселям ничего не должно быть поставлено в соответствие.

Существует множество алгоритмов стерео соответствия, но в основном их можно разделить на две группы: глобальные и локальные, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. Глобальные алгоритмы более точны и имеют лучшее

качество по сравнению с локальными, однако они могут иметь неприемлемое время выполнения, в отличие от локальных алгоритмов, которые более эффективны. Локальные алгоритмы вычисляют смещение для каждой точки, используя ее локальную окрестность, а целью глобальных алгоритмов является поиск наилучшей карты смещений для всего изображения.

В последнее время приобретают популярность методы, пытающиеся совместить сильные стороны локальных и глобальных алгоритмов. Решение в каждом пикселе принимается независимо, однако влияние на него оказывают либо все остальные пиксели изображения, либо часть пикселей, не ограниченных локальной окрестностью данной точки. Одним из таких алгоритмов является алгоритм полуглобального сопоставления (Semi-Global Matching - SGM)².

Алгоритм Semi-Global Matching является одним из наиболее оптимальных алгоритмов стерео сопоставления, так как он в себе сочетает качество глобальных подходов и скорость локальных. Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Вычисление попиксельной стоимости
2. Суммирование попиксельных стоимостей
3. Вычисление карты смещений

Более подробно об алгоритме можно прочитать в работе Hirschmuller².

Зная геометрическое расположение камер, их внутренние параметры и карту смещений, при помощи триангуляции можно вычислить карту глубины. Пусть камеры параллельны (всегда можно достичь при помощи ректификации), расстояние между камерами равно d , а фокусное расстояние равно f . Пусть точка в трехмерном мире имеет координаты (x, y, z) , где z и есть глубина, которую необходимо вычислить, (x_l, y_l) и (x_r, y_r) координаты точки на левой и правой плоскости изображений соответствующих камер. Тогда координаты x , y и z можно вычислить по формулам:

$$\frac{z}{d} = \frac{f}{x_l - x_r} \Rightarrow z = \frac{df}{x_l - x_r},$$
$$x = \frac{d(x_l + x_r)}{2(x_l - x_r)}, \quad y = \frac{d(y_l + y_r)}{2(x_l - x_r)},$$

где $x_l - x_r$ есть смещение.

² H. Hirschmuller, “Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi Global Matching and Mutual Information.” IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, vol. 2, pp. 807-814 2005.

Тем самым для каждой точки мы имеем трехмерные координаты. Полученные координаты преобразуем в облако точек (point cloud). Облако точек (point cloud) - это структура данных, которая содержит многомерную информацию или другими словами множество точек в некой системе координат.

В большинстве 3D приложений облако точек непосредственно не используется, а преобразуется в полигон или модели треугольников или CAD модель. Данный процесс называется 3D реконструкцией или восстановлением поверхности. Восстановление поверхности (surface reconstruction) - это процесс соединения точек надлежащим образом для восстановления поверхности. Более формально задачу восстановления поверхности можно определить следующим образом:

Дано множество точек S , полученных из первоначальной поверхности U , нужно построить поверхность U' так, чтобы все точки из S лежали на U' или были бы рядом с ней и поверхность U' аппроксимирует изначальную поверхность U .

На рисунке 3 показано облако точек и восстановленная по ней поверхность.

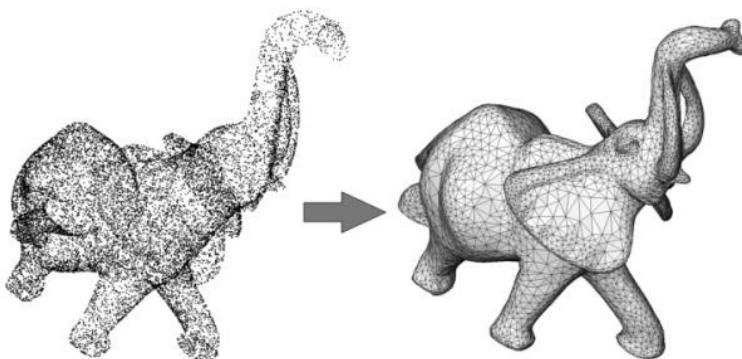


Рисунок 3: Облако точек и восстановленная поверхность.

Полученная 3D модель может быть распечатана на 3D принтере.

В главе 2 описана проблема 3D регистрации, предложен метод регистрации облаков точек и метод создания 3D модели объекта. В начале рассмотрим проблему регистрации облаков точек. На практике для множества задач, например, для построения трехмерной модели объекта или 3D реконструкции здания, часто полученные облака точек бывает необходимо соединить в одно единое облако точек. Данный процесс называется 3D регистрация или регистрация облаков точек. 3D регистрация - это процесс объединения множество облаков точек разных сцен в одно

общее облако точек. Другими словами, во время регистрации множество облаков точек преобразуются в одну единую координатную систему. На рисунке 4 показан пример регистрации облаков точек, где облака точек различных ракурсов соединяются в одно единое облако точек.

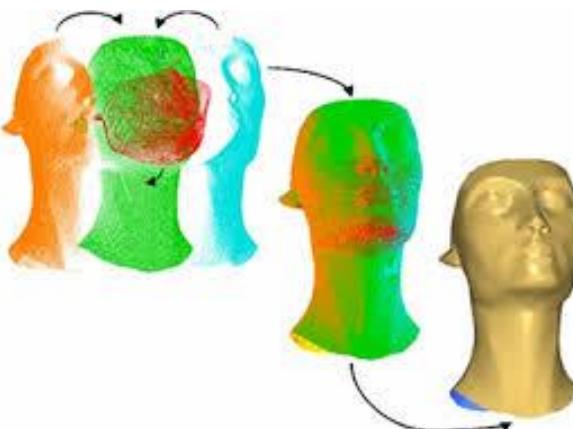


Рисунок 4: Пример регистрации облаков точек.

Рассмотрим формально задачу регистрации двух облаков точек: пусть даны исходное (source) облако точек ($P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$) и целевое (target) облако точек ($Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$). Необходимо найти такое неподвижное преобразование T , применяя которое к облаку точек P приведет его точки в одну систему координат с Q .

Преобразования T из себя представляет матрицу вращения R (rotation matrix) и вектор сдвигов t (translation vector). T имеет вид:

$$T = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Наиболее популярным и эффективным алгоритмом 3D регистрации является итеративный алгоритм ближайших точек (ICP - Iterative Closest Point). Суть алгоритма ICP заключается в том, что он итеративно соединяет облака точек, на каждой итерации уменьшая расстояние между облаками точек. Допустим мы хотим соединить облака

точек P и Q. Цель алгоритма ICP найти такое преобразование, применение которого к P минимизирует расстояние между облаками точек. Алгоритм состоит из следующих основных шагов:

- 1) Поиск соответствующих точек между двумя облаками точек, соответствующие точки находятся по принципу ближайшей точки, т.е. для каждой точки из облака P находится ближайшая ей точка из облака Q.
- 2) Поиск преобразования применение которого к облаку точек P, уменьшает ошибку E. В качестве метрики ошибки используется метрика точка-плоскость, которая определяется формулой: $E = \sum_{i=1}^N \|((Rp_i + t) - q_i)n_i\|^2$, где p_i и q_i - соответствующие точки, R - матрица поворотов, t - вектор сдвигов, n_i - нормаль точки q_i .
- 3) Применение вычисленного преобразования к облаку точек P.

Но данный алгоритм зависит от начального преобразования, для достижения хороших результатов ему необходимо, чтобы облака точек были близки друг к другу. Поэтому часто бывает необходимо чтобы пользователь вручную приблизил облака точек или же выбрал одинаковые точки в обоих облаках точек. В данной работе предложен автоматический метод регистрации облаков точек, который вначале обрабатывает облака точек (применяет фильтр Statistical-Outlier Removal для удаления шумов), далее в качестве начальной регистрации использует метод регистрации на основе FPFH дескриптора и улучшает результат при помощи алгоритма ICP.

Рассмотрим алгоритм регистрации на основе FPFH дескриптора. Во время регистрации на основе FPFH дескриптора вычисляются характеристики (особенности, features) и на их основе находятся соответствующие точки между облаками точек. Алгоритм состоит из следующих шагов: вычисление FPFH дескриптора, вычисление соответствий, отбрасывание плохих соответствий и вычисление преобразования.

Дескрипторы характеристик или особенностей (feature descriptors) - из себя представляет структуры, которые описывают данные. Дескрипторы используют геометрическую информацию для описания данных, также иногда используется и цветовая информация. Хорошие дескрипторы характеристик должны быть устойчивы к шумам, быстро вычисляемы, быстро сравнимы и неизменны относительно вращения и сдвига облака точек. К таким дескрипторам относится FPFH (Fast Point Feature

Histograms)³, который использует локальную окрестность точки для ее описания.

Соответствие - это пара точек или характеристик из двух облаков точек, которая соответствует одной и той же точке. Другими словами, соответствие — это пара точек, которую алгоритм нахождения соответствий предлагает, как одинаковую точку в обоих облаках точек.

Из-за шума или других факторов в множестве найденных соответствий присутствуют плохие (ложные) соответствия, которые отрицательно влияют на результат регистрации. Для решения этой задачи существуют множество алгоритмов, которые отбрасывают плохие соответствия.

После того, как вычисляется конечное множество соответствий вычисляется преобразование. Один из методов вычисления преобразования является сингулярное разложение матрицы (SVD).

На рисунке 5 показаны регистрируемые облака точек, которые повернуты на 45 градусов по отношению друг друга. А на рисунке 6 приведено сравнение результатов регистрации алгоритма ICP с разработанным алгоритмом регистрации.

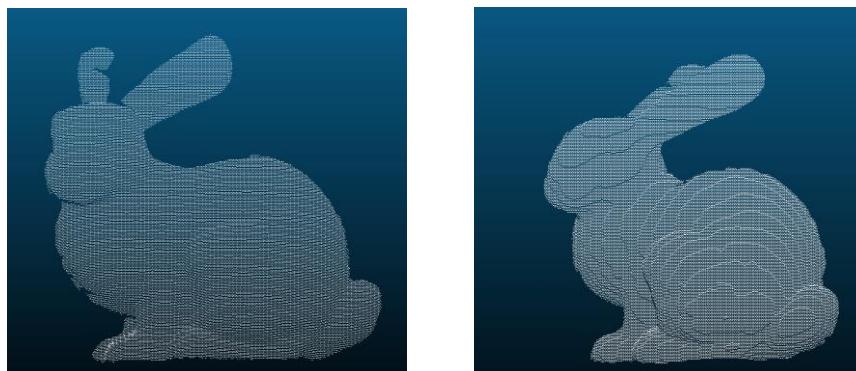
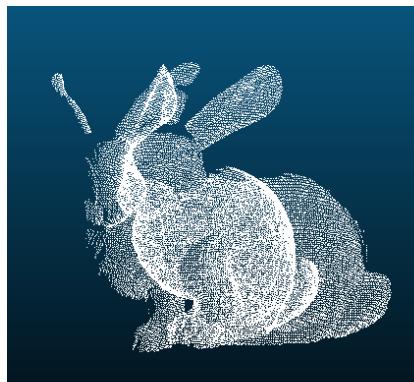
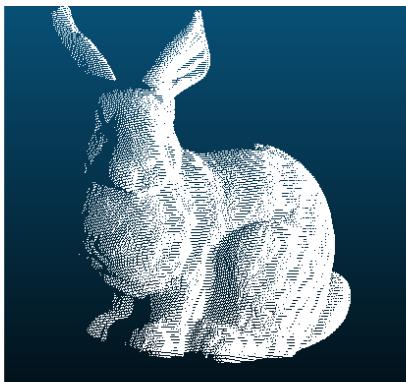


Рисунок 5: Облака точек различных ракурсов объекта.

³ Radu Bogdan Rusu, Nico Blodow, Michael Beetz, "Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D Registration", ICRA'09 Proceedings of the 2009 IEEE international conference on Robotics and Automation, pp. 3212-3217, 2009.



а)



б)

Рисунок 6: а) Регистрация только при помощи ICP алгоритма, б) Разработанный алгоритм регистрации.

Рассмотрим предложенный метод создания 3D модели объекта. Фотографируем объект двумя камерами и при помощи стереозрения вычисляем карту глубины и преобразуем ее в облако точек. Данный процесс выполняется для различных ракурсов объекта. Для каждого облака точек объект отделяется от сцены, тем самым получаем облако точек объекта. Далее полученные облака точек, которые соответствуют различным ракурсам объекта, соединяются при помощи предложенного алгоритма 3D регистрации.

В главе 3 описан разработанный программный комплекс, который комбинируя теоретические основы стереозрения, предложенный алгоритм регистрации и алгоритмы работы с трехмерными данными, позволяет получить 3D модель реального физического объекта. Для получения трехмерной модели объекта достаточно иметь две обычные веб-камеры. Для построения трехмерной модели необходимо знать параметры камер и их геометрическое расположение по отношению друг друга, которые можно вычислить предварительно откалибровав камеры. Объект фотографируется с разных ракурсов одновременно двумя камерами. Далее на основе этой последовательности изображений наша программное обеспечение строит трехмерную модель.

Программное обеспечение было разработана на языке C++ в среде разработки Microsoft Visual Studio с использованием библиотек OpenCV и PCL.

Программный комплекс состоит из различных модулей, каждый из которых может быть использован отдельно. Например, модуль стерео соответствия (DisparityMap) для вычисления карты смещений по стереопаре изображений, модуль калибровки (Calibration) для калибровки камер, модуль регистрации (Registration) для совмещения имеющихся облаков точек. Основные модули программы вместе с основными функциями показаны на рисунке 7.

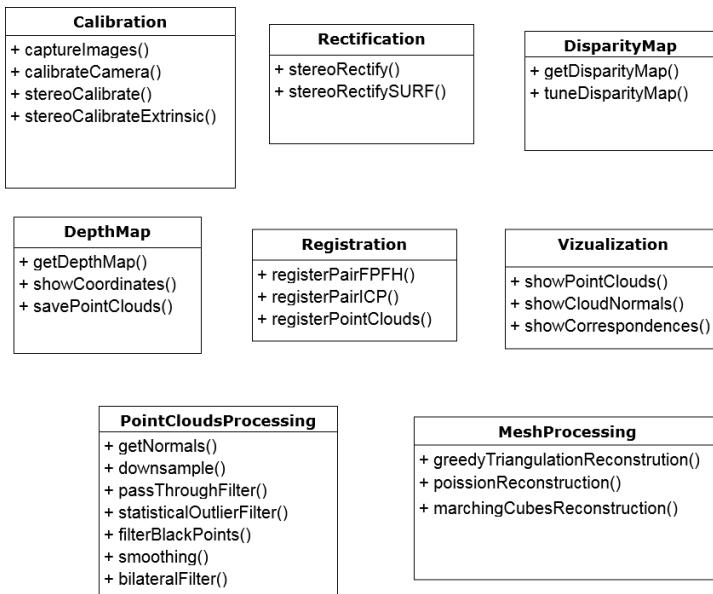


Рисунок 7: Основные модули программного комплекса.

Рассмотрим в отдельности основные модули с их основными функциями.

Модуль калибровки (Calibration) - используется для вычисления внутренних и внешних параметров камеры. Основные функции:

- `calibrateCamera()` – калибрует камеру и сохраняет внутренние параметры камеры в .yml файле.
- `stereoCalibrate()` – стерео калибрует две камеры, вычисляя все внутренние и внешние параметры камер, сохраняя их в файле.
- `stereoCalibrateExtrinsic()` – стерео калибрует две камеры, вычисляя внешние параметры камер на основе заранее вычисленных внутренних параметров камер, которые могут быть вычислены при помощи функции `calibrateCamera`.

- `captureImages()` – захватывает изображения в режиме реального времени одновременно для двух камер.

Модуль ректификации (Rectification) - применяется для выравнивания стереопары изображений, таким образом, чтобы они имели одинаковую плоскость изображений. Основные функции:

- `stereoRectify()` – на основе вычисленных параметров ректификации, ректифицирует стереопару.
- `stereoRectifySURF()` – ректифицирует стереопару, не зная параметры камер. Ректификация выполняется на основе дескриптора характеристик SURF. Данная функция, в основном дает хуже результаты, чем `stereoRectify` и может быть использована только в том случае, когда неизвестны параметры камер.

Модуль построения карты смещений (DisparityMap) - вычисляет карту смещений при помощи алгоритма Semi Global Matching. Основные функции:

- `getDisparityMap()` – из стереопары изображений вычисляет и возвращает карту смещений.
- `tuneDisparityMap()` – для алгоритма стерео соответствия SGM важную роль играет выбор значения параметров. Данная функция дает пользователю графическую возможность изменить значения параметров и посмотреть, как это влияет на вычисление карты смещений.

Модуль построения карты глубины / облака точек (DepthMap) - данный модуль по карте смещений и по параметрам камер, при помощи триангуляции вычисляет карту глубины. Карта глубины сразу преобразуется в облако точек, хотя может быть сохранена и в других форматах. Основные функции:

- `getDepthMap()` – возвращает карту глубины в виде облака точек
- `showCoordinates()` – показывает пользователю исходное изображений левой камеры, и дает пользователю возможность кликать на пиксели изображения. Для выбранных пикселей выводятся на экран их трехмерные координаты X, Y, Z.
- `savePointClouds()` - для данного множества стереопар функция вычисляет и сохраняет соответствующие им облака точек. Перед сохранением облака точек, применяется фильтр прохождения-через (pass-through filter), который отбрасывает все точки, координаты которых не находятся в заданном диапазоне. Для каждой координаты задается свой диапазон. Выбрав

правильные диапазоны, можно отделить объект от сцены. Данная функция используется для получения облаков точек объекта для разных ракурсов, которые потом используются при регистрации.

Модуль обработки облаков точек (PointCloudsProcessing) - в данном модуле содержатся различные вспомогательные функции для работы с облаками точек, которые выполняют различные фильтры и вычисляют дополнительную информацию, такую как нормали облака точек. Основные функции:

- `getNormals()` – вычисляет нормали для заданного облака точек.
- `downsample()` – выполняет даунсэмплинг, то есть уменьшает разрешения облака точек. Данная функция уменьшает количество точек в облаке точек, что положительно влияет на эффективность.
- `passThroughFilter()` – данная функция для заданного поля (координаты), отбрасывает все точки, для которых значение этого поля не входит в заданный диапазон.
- `statisticalOutlierFilter()` – применяет фильтр удаления удаленных точек на основе статистики к облаку точек.
- `filterBlackPoints()` - в некоторых случаях, в облаке точек присутствуют лишние черные точки. Данная функция удаляет черные точки из облака точек.
- `smoothing()` - делает облако точек более гладким.
- `bilateralFilter()` - применяет билатеральный фильтр (bilateral filter) к облаку точек.

Модуль регистрации (Registration) - данный модуль используется для соединения облаков точек различных ракурсов.

- `registerPairFPFH()` - соединяет пару облаков точек, при помощи алгоритма регистрации на основе FPFH дескриптора.
- `registerPairICP()` - соединяет пару облаков точек, при помощи алгоритма ICP.
- `registerPointClouds()` - соединяет множество облаков точек в одно единое облако точек, на основе разработанного алгоритма регистрации. Берется первое облако точек в качестве глобальной модели. По очереди берется следующее последовательное облако точек и соединяется с глобальной моделью при помощи разработанного алгоритма регистрации.

Модуль визуализации (Visualization) - в данном модуле реализованы различные функции визуализации данных. Основные функции:

- `showPointCloud()` - показывает облако точек
- `showCloudNormals()` - показывает нормали облака точек
- `showCorrespondences()` - показывает соответствия между двумя облаками точек

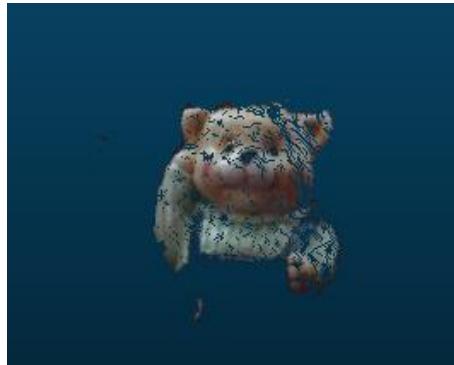
Модуль восстановления поверхности (`MeshProcessing`) - применяется для восстановления поверхности из облака точек. Основные функции:

- `greedyTriangulationReconstruction()` - возвращает полигональную модель, построенную из облака точек при помощи алгоритма Greedy Triangulation.
- `poissonReconstruction()` - возвращает полигональную модель, построенную из облака точек при помощи алгоритма Poisson Reconstruction.
- `marchingCubesReconstruction()` - возвращает полигональную модель, построенную из облака точек при помощи алгоритма Marching Cubes.

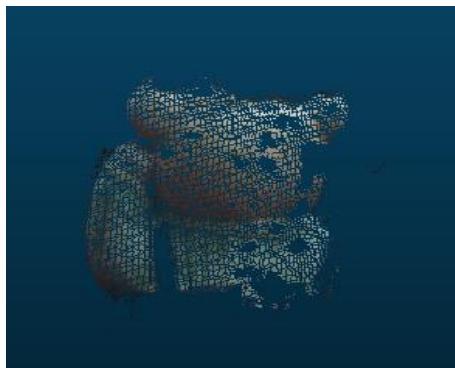
На рисунке 8 показаны полученные облака точек разных ракурсов объекта, а на рисунке 9 полученная модель после регистрации.



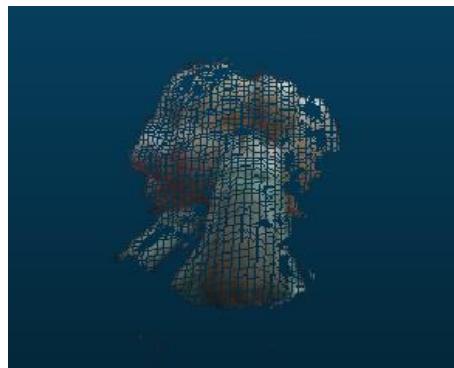
(а)



(б)

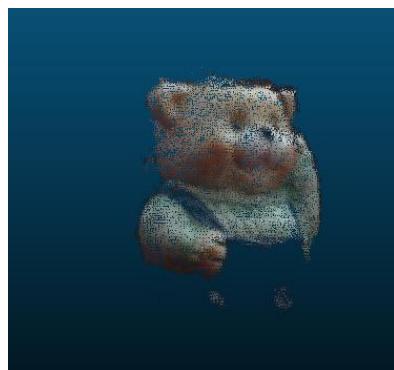


(в)

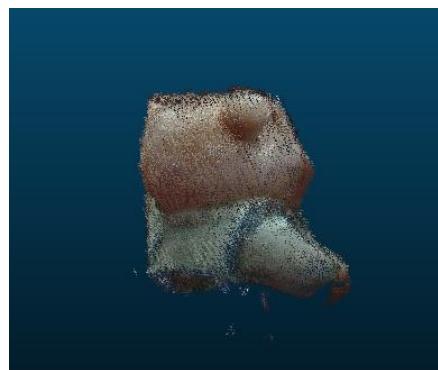


(г)

Рисунок 8: Облака точек объекта с различных ракурсов.



(а)



(б)

Рисунок 9: 3D модель объекта после регистрации облаков точек.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработан алгоритм регистрации облаков точек, который использует алгоритмы предварительной обработки облаков точек, алгоритм регистрации на основе FPFH (Fast Point Feature Histograms) дескриптора и ICP (Iterative Closest Point) алгоритм [2,4].
2. Разработан метод создания 3D модели на основе стереоизрения и разработанного алгоритма регистрации облаков точек [1,3,4].

3. Разработан программный комплекс, который позволяет получить 3D модель реального объекта. Он состоит из модулей, которые могут быть использованы для различных целях таких, как калибровка камеры, получения карты глубины, регистрация облаков точек и т. д. [2,5,6].

СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. А. Геворкян, «ПОЛУЧЕНИЕ 3D МОДЕЛИ ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ СТЕРЕОЗРЕНИЯ», вестнике Национального Политехнического Университета Армении, Информационные технологии, Электроника, Радиотехника, № 2, с. 42-49, Ереван, Армения, 2016.
2. Aram Gevorgyan Vladimir, “Point clouds registration and generation from stereo images”, ITHEA Journal, "Information Content and Processing", Vol. 3, Number 2, pp. 193-200, Bulgaria, 2016.
3. Aram V. Gevorgyan and Hakob G. Sarukhanyan, “3D Scanner from Two Web Cameras”, Mathematical Problems of Computer Science 44, pp. 42-50, Yerevan, Armenia, 2015.
4. Aram Gevorgyan Vladimir, “AUTOMATIC REGISTRATION OF POINT CLOUDS WITH FPFH DESCRIPTOR”, Научные горизонты, Vol. 3, pp. 55-60, Belgorod, Russia, 2017.
5. Aram V. Gevorgyan, “Point Clouds Preprocessing for Better Registration”, Mathematical Problems of Computer Science 48, pp. 82-88, Yerevan, Armenia, 2017.
6. Vahan Gevorgyan Vladimir, Aram Gevorgyan Vladimir, Gevorg Karapetyan Arakel. Exemplar based inpainting using depth map information, ITHEA Journal, “Information Theories and Applications”, Vol. 23, Number 3, pp. 273-281, Bulgaria, 2016.

Resume

Aram Gevorgyan

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF 3D OBJECTS SYNTHESIS METHODS FROM SEQUENCE OF 2D DIGITAL IMAGES

3D technologies is one of the most popular and developing areas nowadays. They have many applications at different spheres of our lives, such as, film industry, video and computer games, virtual reality applications, robotics, geo-information systems, biometrics, medicine, archeology and military affairs. One of the most popular problems in this sphere is constructing 3D model of real physical object, which is very actual and has many applications.

3D model construction is performed by 3D scanning. 3D scanner is a device for getting 3D information of surrounded world. 3D scanners are divided into two types: contact and non-contact. Contact 3D scanners need physical contact with the object to get 3D information. Non-contact 3D scanners use active or passive methods. Active methods emit directed waves to the object, while passive methods analyze reflected ambient radiation. Output of most 3D scanners is point cloud. Point cloud is a set of points in some coordinate system.

Most of the 3D scanners need expensive equipment and are sensitive to environment, lighting and object surfaces. So building available 3D scanner that gives good results is actual problem.

The more available solution of creating object's 3D model can be achieved by using stereovision. Stereovision is passive 3D scanning method that allows to get 3D information by using two cameras. However, in order to use stereovision for getting object's 3D model the problem of merging different views of object must be solved.

Generated 3D model has many applications, one of which is 3D printing. Since 200 years, 3D printing is active developing.

The aim of this thesis is to develop software package that allows getting 3D model of a real physical object using two cameras. This software must combine stereovision methods with the algorithms that work with 3D data and solve problems of camera calibration, stereo correspondence, point cloud construction, point clouds registration and surface reconstruction from point cloud. The software must be also user-friendly and represents 3D model in a format that is convenient for 3D printing.

Scientific novelty

- Point clouds registration method that for initial registration uses algorithm of registration with FPFH descriptor and refines results with ICP algorithm is developed.
- The method of object's 3D model generation from two cameras that combines stereovision algorithms with proposed point clouds registration method is developed.
- Software package, which combines proposed methods with known algorithms, that allows getting object's 3D model is developed.

Applicability of the results

Based on developed methods software is created which using two common web-cameras allows to get 3D model of real object. Created 3D model can be used in 3D graphics or 3D printing. With this software we get 3D model of the object that was printed with 3D printer.

The following statements are presented for defense:

1. Method of point clouds registration that for initial transformation uses proposed registration algorithm with FPFH (Fast Point Feature Histograms) descriptor and then refines results with ICP (Iterative Closest Point) registration algorithm [2, 4].
2. Method of creating object's 3D model by using stereovision. This method gets 3D model of object by combining stereovision algorithms with proposed point clouds registration algorithm [1, 3, 4].
3. Software that realizes proposed algorithms and allows getting 3D model of physical object [2, 5, 6].

Ամփոփում Արամ Գևորգյան

ԵՐԿՎԱՓ ԹՎԱՅԻՆ ՊԱՏԿԵՐՆԵՐԻՑ ԵՌԱՋԱՓ ՕԲՅԵԿՏԻ ՍԻՆԹԵԶԱԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄ ԵՎ ԻՐԱԿԱՆԱՑՈՒՄ

Մեր ժամանակներում ակտիվ զարգանում են եռաչափ տեխնոլոգիաները, որոնց կիրառությունը ընդգրկում է կյանքի այնպիսի արդիական ասպարեզներ, ինչպիսիք են կինոարդյունաբերությունը, վիդեո և համակարգչային խաղերը, վիրտուալ իրականության հավելվածները, ոռորոտաշինությունը, աշխարհագրական տեղեկությունների համակարգերը, կենսաչափությունը, բժժկությունը, հնագիտությունը ու ազմագիտությունը և այլն: Այս ոլորտի առանցքային խնդիրներից է՝ իրական ֆիզիկական օբյեկտից 3D մոդելի կառուցումը, ինչը շատ արդիական է և ունի բազմազան կիրառություններ:

Օբյեկտի եռաչափ մոդելը կառուցվում է 3D սկանավորման միջոցով: 3D սկաներ կոչվում է այն սարքը, որը նախատեսված է շրջապատող աշխարհի եռաչափ մոդելը (տվյալները) ստանալու համար: 3D սկաներները լինում են կոնտակտային և ոչ կոնտակտային: Կոնտակտային 3D սկաներներն օբյեկտի եռաչափ տվյալները ստանում են ֆիզիկական շփման միջոցով: Ոչ կոնտակտային 3D սկաներները նույն խնդիրի լուծման համար օգտագործում են ակտիվ կամ պասիվ մեթոդներ: Ակտիվ մեթոդներով 3D սկաներները ուղղորդված ալիքներ են ճառագայթում ուսումնասիրվող օբյեկտի վրա, իսկ պասիվ մեթոդներով՝ վերլուծում են շրջակա միջավայրից անդրադարձված ճառագայթումը: 3D սկաներների լայն հատվածի համար արդյունք է հանդիսանում կետերի ամայը: Կետերի ամայը որոշակի կոորդինատային համակարգի կետերի բազմություն է:

Մեծամասամբ 3D սկաներները պահանջում են թանկարժեք սարքավորումներ, զգայուն են շրջակա միջավայրի հանդեպ (լուսավորություն, օբյեկտի մակերևույթ): Ուստի կառուցել մատչելի 3D սկաներ, որը տախս է լավ արդյունքներ, շատ արդիական խնդիր է:

Օբյեկտի 3D մոդելը ստանալու խնդիրը հնարավոր է լուծել ավելի մատչելի եղանակով, եթե օգտագործել ստերեոտեսողությունը: Ստերեոտեսողությունը հանդիսանում է 3D սկանավորման պասիվ մեթոդ, որն թույլ է տախս ստանալ եռաչափ ինֆորմացիան երկու տեսախցիկի միջոցով: Սակայն, որպեսի օգտագործել ստերեոտեսողությունը օբյեկտի 3D մոդելը կառուցելու համար, անհրաժեշտ է լուծել օբյեկտի տարբեր տեսարանների միավորման խնդիրը:

Սկանավորման արդյունքում ստացված 3D մոդելը ունի բազում կիրառություններ, որոնցից մեկն է 3D տպագրությունը: 2000 թվականներից սկսած 3D

տպիչներն ակտիվ զարգանում են:

Ատենախոսության նպատակն է մշակել ծրագրային համալիր, որը թույլ է տալիս երկու տեսախցիկի օգնությամբ ստանալ իրական ֆիզիկական օբյեկտի եռաչափ մոդելը: Սույն համակարգը պետք է ստերեոտեսողության մեթոդները համատեղի եռաչափ տվյալների հետ աշխատող ալգորիթմների հետ և լուծի տեսախցիկների չափարերման, ստերեոհամապատասխանության, կետերի ամպերի կառուցման, կետերի ամպերի միավորման և կետերի ամպերից մակերևույթ ստանալու խնդիրները:

Գիտական նորույթը

- Մշակվել է կետերի ամպերի միավորման մեթոդ, որը օգտագործում է կետերի ամպերի մշակման ալգորիտմներ, FPFH նկարագրիչով միավորման ալգորիթմը և լավացնում է արդյունքը ICP ալգորիթմի միջոցով:
- Մշակվել է երկու տեսախցիկով օբյեկտի 3D մոդել ստանալու մեթոդ, որը ներառում է ստերեո տեսողության ալգորիթմները և կետերի ամպերի միավորման մեթոդը:
- Մշակվել է ծրագրային համալիր, որը միավորելով առաջարկված մեթոդները հայտնի ալգորիթմների հետ թույլ է տալիս ստանալ ֆիզիկական օբյեկտի եռաչափ մոդելը:

Արդյունքների կիրառական նշանակությունը

Մշակված մեթոդների հիման վրա ստեղծվել է ծրագրային համալիր, որն օգտագործելով երկու ստվորական տեսախցիկ, ստանում է իրական օբյեկտի 3D մոդելը: Ստացված 3D մոդելը կարելի է օգտագործել 3D գրաֆիկայում, և տպագրել 3D տպիչի օգնությամբ: Ծրագրային համակարգի միջոցով մշակվել և 3D տպիչով տպագրվել է օբյեկտի եռաչափ մոդելը:

Պաշտպանությանը ներկայացվող դրույթները

- Կետերի ամպերի միավորման մեթոդը, որը նախ միացնում է կետերի ամպերը FPFH (Fast Point Feature Histograms) նկարագրիչի հիման վրա առաջարկված միավորման ալգորիթմով, այնուհետև ICP (Iterative Closest Point) ալգորիթմի միջոցով լավացնում է արդյունքները [2, 4]:
- Ստերեոտեսողության օգտագործմամբ օբյեկտի եռաչափ մոդելը ստանալու մեթոդը [1, 3, 4]:
- Վերոնշվյալ մեթոդներն ու ալգորիթմերն իրականացնող ծրագրային համալիր, որը թույլ է տալիս ստանալ իրական օբյեկտի 3D մոդելը [2, 5, 6]: