

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт математики и фундаментальной информатики
Кафедра высшей и прикладной математики

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ С. Г. Мысливец

« ____ » _____ 20__ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРИАНГУЛЯЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНЕРА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

Направление 01.04.02 Прикладная математика и информатика

Магистерская программа 01.04.02.06 Прикладная математика и
информатика в гуманитарных и социально-экономических науках

Руководитель	_____	доцент, кандидат физико- математических наук	В. Р. Куликов
Выпускник	_____		М. В. Ларичкин
Нормоконтролер	_____		Т. Н. Шипина

Красноярск 2024

АННОТАЦИЯ

Определение формы объектов бесконтактным образом — одна из распространенных задач современных науки и техники. В целях исследования и развития триангуляционных методов сканирования в рамках данной работы был предложен способ определения внутренних параметров триангуляционного лазерного сканера с помощью модельной плоскости. Для предложенного метода построены математические модели калибровки и сканирования триангуляционного лазерного сканера, составлены алгоритмы этих процессов. Написан программный код, реализующий составленные алгоритмы. В экспериментальной части проведены компьютерные симуляции, подтвердившие работоспособность алгоритмов калибровки и сканирования и позволившие оценить их точность. При симуляции калибровки отклонение вектора нормали к плоскости лазерного излучения от теоретического направления не превысило 3° . При оценке точности сканирования для объекта сферической формы стандартное отклонение радиуса точек от реального радиуса объекта не превысило 13.2%.

Ключевые слова: модельная плоскость, проективная геометрия, PnP-задача, метод главных компонент, метод наименьших квадратов

ABSTRACT

Determining the shape of objects in a non-contact methods is one of the common problems of modern science and technology. In order to research and develop triangulation scanning methods, this work proposes a method for determining the internal parameters of a triangulation laser scanner using a model plane. Mathematical models of calibration and scanning of a triangulation laser scanner were constructed, and algorithms for these processes were compiled for the proposed method. Software has been developed that implements the constructed algorithms. In the experimental part, computer simulations were carried out, which confirmed the performance of the calibration and scanning algorithms and made it possible to evaluate their accuracy. During the calibration simulation, the deviation of the normal vector to the plane of laser radiation from the theoretical direction did not exceed 3° . During assessing the scanning accuracy for a spherical object, the standart deviation of the radius of the points from the actual radius of the object did not exceed 13.2%.

Keywords: model plane, projective geometry, PnP-problem, principal component analysis, least squares method

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Теоретическая часть	7
1.1 Модель камеры. Однородные координаты	7
1.2 Переход в систему координат камеры	10
1.3 Модель источника лазерного излучения	10
1.4 Исправление дисторсий оптической системы	11
1.5 Алгоритм процесса сканирования. Модель сканера	12
1.6 Вычисление внутренних параметров камеры и ее положения в пространстве. PnP-задача	16
1.7 Вычисление параметров плоскости лазерного излучения. Метод главных компонент	21
2 Экспериментальная часть	24
2.1 Алгоритм калибровки сканера	24
2.2 Компьютерная симуляция калибровки	26
2.3 Оценка точности алгоритма калибровки	28
2.4 Компьютерная симуляция работы триангуляционного лазерного сканера	29
2.5 Оценка точности разработанного алгоритма	30
Заключение	32
Список использованных источников	33
Приложение А Листинг кода	35

ВВЕДЕНИЕ

В наши дни в различных областях промышленности, медицины и научной деятельности часто необходимо осуществлять контроль поверхности изделий или производственного оборудования, распознавать и визуализировать форму физических объектов.

Для решения подобного рода задач широко применяются 3D-сканеры, основанные на различных методах. Методы сканирования можно разделить по принципу взаимодействия с сканируемой поверхностью на контактные и бесконтактные. Бесконтактные сканеры, в свою очередь, подразделяются на активные и пассивные. Пассивные сканеры, как правило, используют при работе отраженный от объекта естественный видимый свет или естественное инфракрасное излучение, как самые доступные виды окружающего излучения. Отличием активных бесконтактных сканеров от пассивных бесконтактных сканеров является использование дополнительных источников электромагнитного излучения или источников звуковых колебаний.

Каждый тип сканеров обладает своими преимуществами и недостатками. Некоторые из недостатков могут оказаться критическими для решения тех или иных прикладных задач. Например, основным серьезным недостатком контактных методов сканирования является необходимость доступа к поверхности сканируемого объекта, не всегда есть возможность обеспечения такого доступа. Также контактные методы могут приводить к повреждениям объектов или необратимым изменениям их поверхности. При необходимости сканирования крупных объектов, контактные методы сканирования сильно проигрывают в скорости бесконтактным методам. Ввиду перечисленных недостатков контактных методов в последние годы активно развиваются бесконтактные методы сканирования и, в частности, активные бесконтактные сканеры. К преимуществам активных бесконтактных сканеров относятся независимость от внешних источников излучения и, как следствие, меньшее количество помех при проведении измерений и более высокая точность измерений, а также возможность сканирования, как правило, в большей рабочей зоне. Особенно в последнее время широко распространены и становятся доступнее искусственные источники лазерного излучения, совершенствуются и удешевляются системы получения

изображений, что делает конструкции активного бесконтактного сканирования близкими по стоимости реализации к установкам, использующим пассивный метод и значительно дешевле более сложных установок контактного сканирования.

Одним из бесконтактных активных методов 3D-сканирования является триангуляционный метод, использующий плоский лазерный луч для зондирования поверхности объекта и камеру для фиксирования положения точек пересечения лазерного излучения с поверхностью сканируемого объекта. «Триангуляционный» сканер называется так потому, что при его нормальной работе определяются параметры треугольника «лазер-камера-подсвеченная точка», зная которые, можно однозначно определить положение точки в пространстве относительно камеры (т. е. в системе координат, связанной с камерой). К особенностям триангуляционных сканеров можно отнести ограниченную дальность действия (в пределах нескольких метров), высокую точность (до десятков микрометров) относительно, например, сканеров основанных на измерении времени прохождения световой волны, а также относительную простоту и дешевизну компонентов. Все эти факторы делают триангуляционный метод сканирования с использованием лазера, излучение которого распространяется в плоскости, хорошим выбором, если необходимо построить достаточно подробную 3D-модель какого-либо объекта небольшого размера, помещающегося в поле зрения камеры на расстоянии нескольких метров.

Актуальность работы обеспечена разнообразием областей применения 3D-сканеров. Каждая конкретная область приложения технологий создания трехмерной модели имеет свою специфику, и выбор наиболее подходящего метода сканирования остается непростой задачей (см. рис. 1) [1]. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, минимальные теоретические погрешности измерения, стоимость, гибкость, а методы калибровки устройств сканирования продолжают активно совершенствоваться. Поэтому каждая задача требует, помимо изучения уже известных подходов, учета специфических условий, в которых задача должна быть решена.

В рамках данной работы будет рассматриваться модель триангуляционного сканера, излучение лазера которого распространяется в плоскости, что позволяет получать проекцию в форме линии на исследуемом объекте. Для ра-



Рисунок 1 – Разнообразие бесконтактных методов определения 3D-профиля, использующих световое освещение [1]

боты с триангуляционным лазерным сканером необходимо провести его калибровку, то есть получить значения внутренних параметров камеры и уравнение плоскости лазерного излучения в системе координат связанной с камерой.

Целью работы работы являются описание математической модели работы лазерного триангуляционного сканера и создание алгоритма определения значений параметров математической модели для штатной работы сканера (алгоритм калибровки).

Для достижения целей работы необходимо было осуществить:

- Аналитическое представление, с использованием знаний проективной геометрии, преобразования точек трехмерного пространства из модельной системы координат в двумерное пространство точек изображения;
- Теоретическое решение полученной системы уравнений относительно неизвестных параметров;
- Проведение компьютерной симуляции процесса калибровки, для моделирования экспериментальных данных;
- Создание программного кода, реализующего обработку экспериментальных данных и поиск неизвестных параметров;

- Проведение компьютерной симуляции процесса сканирования, с использованием параметров сканера, полученных при симуляции калибровки;
- Создание программного кода, обеспечивающего обработку данных сканирования, полученных в результате симуляции;
- Проведение оценки точности предложенного алгоритма на основании результатов симуляции сканирования.

Основные положения и тезисы данной работы представлялись и обсуждались:

1. на научных семинарах кафедры ВиПМ;
2. заочно на «Международной научной студенческой конференции — 2023 (МНСК — 2023)», г. Новосибирск;
3. на конференции «Информационные технологии и математическое моделирование — 2023 (ИТММ — 2023)», г. Томск;
4. на конференции «Системы управления, информационные технологии и математическое моделирование — 2024 (СУИТиММ — 2024)», г. Омск.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы:

- Описана математическая модель работы триангуляционного лазерного сканера
- Предложен и математически описан алгоритм определения внутренних параметров камеры с помощью модельной плоскости с нанесенной на нее разметкой из ArUco-маркеров
- Предложен и математически описан алгоритм определения положения плоскости лазера сканера в пространстве относительно камеры
- Создан программный код, реализующий процесс обработки данных, полученных в результате сканирования. Создан программный код, реализующий процесс калибровки триангуляционного лазерного сканера на основе предложенного алгоритма
- Проведена компьютерная симуляция процесса калибровки триангуляционного лазерного сканера. Экспериментальные данные обработаны с помощью созданного программного кода. На основе результатов обработки данных компьютерной симуляции оценена точность процесса калибровки. Отклонение эмпирического вектора нормали к плоскости лазерного излучения от теоретического направления в экспериментах не превышает 3° .
- Проведена компьютерная симуляция процесса сканирования объектов различной формы, использующая значения параметров сканера, которые были получены при симуляции калибровки
- На основе данных компьютерной симуляции оценена точность сканирования на примере объекта сферической формы. Стандартное отклонение радиуса точек, полученных эмпирически, от реального радиуса объекта не превышает 13.2%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гужов, В. И. Методы измерения 3D-профиля объектов. Контактные, триангуляционные системы и методы структурированного освещения / В. И. Гужов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – С. 82.
2. Hartley, Richard. Multiple view geometry in computer vision / Richard Hartley, Andrew Zisserman. – Cambridge university press, 2003. – P. 670.
3. Lay, David C. Linear algebra and its applications / David C. Lay, Steven R. Lay, Judi J. McDonald. – Pearson Education India, 2003. – P. 579.
4. Tseng, Paul. A coordinate gradient descent method for nonsmooth separable minimization / Paul Tseng, Sangwoon Yun // *Mathematical Programming*. – 2009. – Vol. 117. – Pp. 387–423.
5. Итерационные методы градиентного спуска для решения линейных уравнений / А. Б. Самохин, А. С. Самохина, А. Я. Скляр, Ю. В. Шестопалов // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 2019. – Т. 59, № 8. – С. 1331–1339.
6. Zhang, Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration: Tech. Rep. MSR-TR-98-71 / Zhengyou Zhang: Microsoft Research, Microsoft Corporation, One Microsoft Way, Redmond, WA 98052-6399, 2008.
7. Moré, Jorge J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory / Jorge J Moré // *Numerical analysis: proceedings of the biennial Conference held at Dundee, June 28–July 1, 1977* / Springer. – 2006. – Pp. 105–116.
8. Madsen, Kaj. Methods for non-linear least squares problems / Kaj Madsen, Hans Bruun Nielsen, Ole Tingleff. – Department of Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, 2004. – P. 58.
9. Pearson, Karl. LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space / Karl Pearson // *The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science*. – 1901. – Vol. 2, no. 11. – Pp. 559–572.
10. Abdi, Hervé. Principal component analysis / Hervé Abdi, Lynne J Williams // *Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics*. – 2010. – Vol. 2, no. 4. – Pp. 433–459.
11. Fiducial markers for pose estimation: Overview, applications and experimental comparison of the artag, apriltag, aruco and stag markers /

Michail Kalaitzakis, Brennan Cain, Sabrina Carroll et al. // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2021. – Vol. 101. – Pp. 1–26.

12. Mapping and localization from planar markers / Rafael Muñoz-Salinas, Manuel J Marín-Jimenez, Enrique Yeguas-Bolivar, Rafael Medina-Carnicer // Pattern Recognition. – 2018. – Pp. 158–171.

13. Kraft, Dieter. A software package for sequential quadratic programming / Dieter Kraft. – Deutsche Forschungs-und Versuchsanstalt fur Luft-und Raumfahrt, 1988. – P. 33.

14. Nocedal, Jorge. Quadratic programming / Jorge Nocedal, Stephen J Wright // Springer Series in Operations Research and Financial Engineering. – 2006. – Pp. 448–492.

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт математики и фундаментальной информатики
Кафедра высшей и прикладной математики

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 С. Г. Мысливец

«21» июня 2024 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРИАНГУЛЯЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНЕРА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

Направление 01.04.02 Прикладная математика и информатика

Магистерская программа 01.04.02.06 Прикладная математика и
информатика в гуманитарных и социально-экономических науках

Руководитель


21.06.24

доцент, кандидат физико-
математических наук

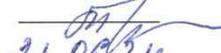
В. Р. Куликов

Выпускник


21.06.24

М. В. Ларичкин

Нормоконтролер


21.06.24

Т. Н. Шипина

Красноярск 2024