

Программный модуль настройки системы измерения 3D геометрии объектов в аэродинамическом стенде методами фазовой триангуляции

В. О. Зуев^{1}, С. В. Двойнишников^{1,2}, И. К. Кабардин², В. Г. Меледин²*

¹ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация

* e-mail: vlad.zuev.0017@mail.ru

Аннотация. В работе представлен программный модуль для гибкой настройки измерительной системы, реализующей методы фазовой триангуляции для изменения трехмерного профиля объектов в аэродинамических экспериментальных стендах. Для настройки и оптимизации широкого спектра параметров измерительного комплекса реализовано универсальное решение – контроль работы алгоритмов фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея. Для оценки погрешности измерений реализован автоматизированный алгоритм на основе статистического анализа распределения координат точек измеренной поверхности.

Ключевые слова: фазовая триангуляция, трехмерная геометрия, программный модуль

Software module for setting up system for 3D geometry measurements in aerodynamic stand using phase triangulation methods

V. O. Zuev^{1}, S. V. Dvoynishnikov^{1,2}, I. K. Kabardin², V. G. Meledin²*

¹ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

² Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: vlad.zuev.0017@mail.ru

Abstract. The paper presents a software module for flexible configuration of a measuring system implements phase triangulation methods to measure three-dimensional profile of objects in aerodynamic experimental stands. To adjust and optimize a wide range of parameters of the measuring system, a universal solution has been implemented, that aimed to control of the operation of phase triangulation algorithms and binary Gray codes. To estimate the measurement error, an automated algorithm is implemented based on a statistical analysis of the distribution of the coordinates of the points of the measured surface.

Keywords: phase triangulation, three-dimensional geometry, software module

Введение

Широкий спектр задач, связанных с бесконтактным измерением трехмерной геометрии, требует разработки и развития соответствующих измерительных систем [1, 2]. Методы фазовой триангуляции обладают рядом преимуществ среди оптических методов измерения трехмерной геометрии: малое время измерения, высокая точность, простота использования, низкая стоимость комплектующих. Широкое применение в промышленных технологиях, научных исследованиях

и медицине демонстрирует существенный уровень развития методов оптической фазовой триангуляции [3].

При настройке измерительной системы выполняется оптимизация параметров для обеспечения минимальной погрешности измерения. Для измерительных комплексов, реализующих метод фазовой триангуляции, выполняют оптимизацию частоты фазовой модуляции, а также оптимизацию настроек оптических элементов источника и приемника оптического излучения [4]. При этом итоговые значения оптимизируемых параметров зависят от размера измерительного объема и конфигурации измерительной системы [5]. Данный факт объясняет проблему масштабирования измерительного комплекса для работы с разными размерами измерительного объема.

Большинство систем измерения трехмерной геометрии триангуляционными методами с использованием структурированного освещения проходят процедуру калибровки и настройки в заводских условиях. Пользователь имеет фиксированный размер измерительной зоны и ограниченный функционал для настройки измерительной системы, что ограничивает масштабируемость измерительного комплекса для работы с разными размерами измерительного объема [6]. Кроме того, такие измерительные системы затруднительно, а в ряде случаев невозможно применять в задачах измерения трехмерной геометрии объектов, расположенных в ограниченном объеме, например, во время проведения модельных экспериментальных исследований на аэродинамических стендах [7, 8].

Данная работа посвящена разработке программного модуля для гибкой настройки измерительной системы, реализующей методы фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея для измерения профиля трехмерных объектов. Работа метода универсальна для различных реализаций измерительных систем и обеспечивает возможность их гибкой настройки для проведения измерений трехмерной геометрии в условиях жестких конструкционных ограничений экспериментальных стендов, ограничивающих возможности размещения измерительной системы.

Функции программного модуля

Программный модуль для настройки системы измерения трехмерной геометрии методами фазовой триангуляции реализует универсальный функционал для оптимизации параметров оптических элементов: источника структурированной засветки и фотоприемника [4].

При настройке алгоритма фазовой триангуляции ключевым является оптимизация частоты модулирующего сигнала [4]. С одной стороны, целесообразно увеличение частоты модулирующего сигнала, т.к. погрешность измерения координаты Z (глубины сцены) согласно [5, 9] обратно пропорциональна частоте пространственной модуляции излучения:

$$\Delta z = \frac{\Delta l \cdot p}{2\pi \cdot I \cdot \sqrt{N} \cdot \operatorname{tg} \theta}, \quad (1)$$

где p – период пространственной модуляции; θ – угол триангуляции; $\frac{\Delta I}{I}$ – относительная погрешность фотоприемника; N – количество фазовых изображений.

На практике, из-за невозможности получить абсолютно резкое изображение частота пространственной модуляции должна быть меньше, чем частота эквивалентного низкочастотного фильтра, которым является оптическая система измерителя [4]. Данные факты определяют необходимость оптимизации частоты модулирующего сигнала.

При настройке параметров оптических элементов требуется оптимизация конфигурации измерительной системы (фокусное расстояние, взаимное расположение, учет влияния внешнего освещения) и оптимизация индивидуальных настроек оптических элементов: экспозиция, усиление, яркость, контраст [10].

Так как требуется настройка и оптимизация широкого спектра параметров измерительной системы, часть которых зависит от конкретной реализации оптических элементов, то была поставлена задача реализации универсального решения для гибкой настройки измерительного комплекса, реализующего алгоритмы фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея [11]. При этом пользователь, анализируя качество работы измерительных методов, может сделать вывод о применимости оптических элементов и их текущих настроек.

Так как итоговой метрикой качества настройки измерительной системы является погрешность измерения трехмерной геометрии объекта, то реализуемый программный комплекс должен иметь соответствующий функционал. В качестве оценки погрешности измерения выступает величина отклонения координат измеренной плоской поверхности от плоскости.

Основные требования к разрабатываемому программному комплексу для гибкой настройки системы измерения трехмерной геометрии методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея:

- контроль работы алгоритмов расшифровки данных методов на основе фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея;
- оценка погрешности измерения трехмерной геометрии плоского объекта.

Реализация программного модуля

Алгоритм работы измерительной системы на основе фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея включает следующие итерации:

- 1) вычисление нелинейности тракта (линейное увеличение яркости проецируемого проектором изображения и его регистрация фотоприемником);
- 2) работа метода бинарных кодов Грея, сбор экспериментальных данных;
- 3) работа методов фазовой триангуляции и фазовых шагов, сбор экспериментальных данных;
- 4) вычисление комбинации фазового кодирования и кодирования Грея;
- 5) восстановление трехмерных координат объекта по экспериментальным и калибровочным данным.

Для анализа работы алгоритмов, реализующих методы фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея реализован функционал (рис. 1) для визуализации следующих промежуточных результатов обработки:

- кривая нелинейности тракта ($I_{\text{projected}}$, $I_{\text{registered}}$ – интенсивности проецируемого и регистрируемого изображений в диапазоне от 0 до 255);
- результаты расшифровки кодов Грея (G – Грей код, p_x – компонента вдоль пиксельного среза по изображению фотоприемника);
- результаты расшифровки фазовых изображений (P – фазовый код; p_x – компонента вдоль пиксельного среза по изображению фотоприемника);
- уточнение расшифровки координат проектора с помощью сопоставления результатов расшифровки фазовых изображений и бинарных кодов (PG – комбинация фазового и Грей кодирования; p_x – компонента вдоль пиксельного среза по изображению фотоприемника).

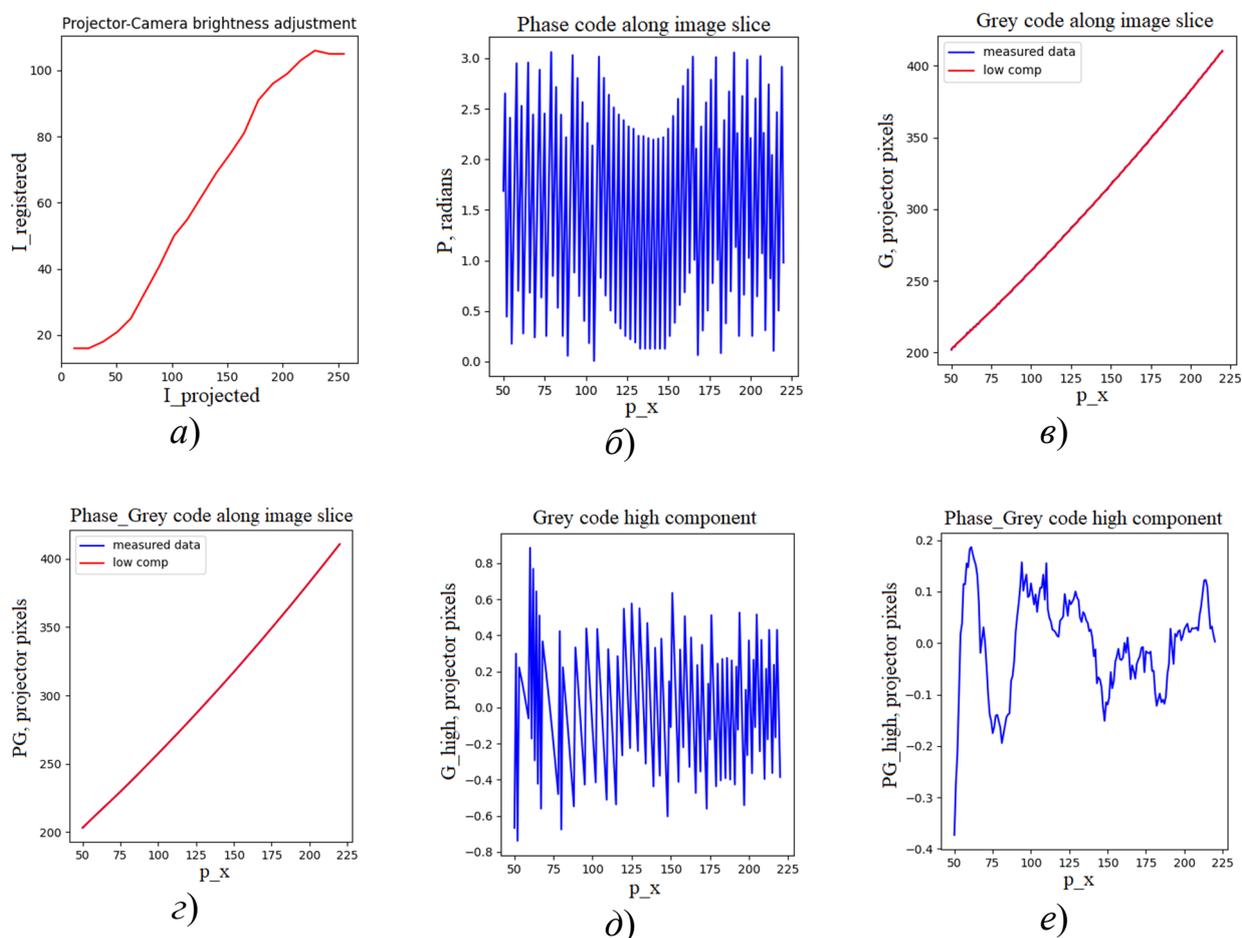


Рис. 1. Графические компоненты для анализа промежуточных результатов работы алгоритмов, реализующих методы фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея:

- а) кривая нелинейности тракта; б) результаты расшифровки фазовых изображений; в) результаты расшифровки кодов Грея; г) сопоставление результатов расшифровки фазовых изображений и кодов Грея; д), е) высокочастотные компоненты бинарных кодов Грея и фазовых изображений

Для контроля работы алгоритма расшифровки бинарных кодов Грея и фазовых изображений поддержана дополнительная возможность анализа их высокочастотных компонент (G_high – высокочастотная компонента Грей кода; PG_high – высокочастотная компонента комбинация фазового и Грей кодирования).

В программном модуле реализована возможность фильтрации экспериментальных точек, лежащих вне заданного трехмерного объема. Данная возможность позволяет исключить трехмерные точки, не относящиеся к измерительному объекту и не входящие в анализируемый массив данных.

Тестирование программного модуля

Выполнено тестирование разработанного программного модуля для гибкой настройки системы измерения трехмерной геометрии методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея. Измерительная система, для которой выполнялась настройка, использовалась для трехмерной диагностики геометрии сложнопрофильных объектов в измерительном объеме 85 мм x 67 мм x 25 мм непосредственно в процессе аэродинамических исследований на экспериментальном стенде. Необходимость настройки измерительной системы также обусловлена спецификой задачи, требующей учета внешних условий освещения и отражающих свойств измеряемой поверхности. Измерительная система включает фотоприемник Imaging Source DMK 33GX264 с объективом Imaging Source TCL 5026 5MP, цифровой проектор Excelvan CL720 с разрешением 1280x800 и светосилой 3000 лм с доработанной оптической системой для формирования резкого изображения на расстоянии 60–80 см.

Выполнена настройка измерительной системы для измерительного объема с характерным размером 85 мм x 67 мм x 25 мм. Произведена оптимизация параметров оптической системы: взаимного расположения проектора и фотоприемника, фокусного расстояния, влияния внешнего освещения, индивидуальных параметров оптических элементов (экспозиция, усиление, яркость и т.д.). Произведена оптимизация частоты модулирующего сигнала (рис. 2).

В результате найдена оптимальная конфигурация измерительной системы для проведения трехмерных измерений профиля объекта в условиях экспериментального стенда: расстояние от источника освещения до объекта составило 65 см, расстояния от фотоприемника до объекта 150 см. Угол между оптическими осями источника и приемника оптического излучения 70° . Достигнута точность измерений 9 мкм.

Заключение

Разработан программный комплекс для гибкой настройки системы измерения трехмерной геометрии методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея. Программный комплекс реализует необходимый функционал для контроля работы методов обработки данных и для оценки погрешности измерительной системы. Выполнено тестирование разработанного программного комплекса для

настройки оптико-электронной системы измерения трехмерной геометрии сложнопрофильных объектов на экспериментальном аэродинамическом стенде. Произведена настройка измерительной системы для измерительного объема с характерным размером 85 мм x 67 мм x 25 мм. Выполнена оптимизация параметров оптической системы: расположения проектора и фотоприемника, фокусного расстояния оптических модулей, влияния внешнего освещения, параметров оптических элементов (экспозиция, усиление, яркость и т.д.). Произведена оптимизация частоты модулирующего сигнала. Достигнута погрешность измерения трехмерной геометрии 9 мкм. В результате измерительная система, реализующая методы фазовой триангуляции, обеспечивает измерение трехмерного профиля непосредственно в процессе аэродинамических исследований на экспериментальной стенде.

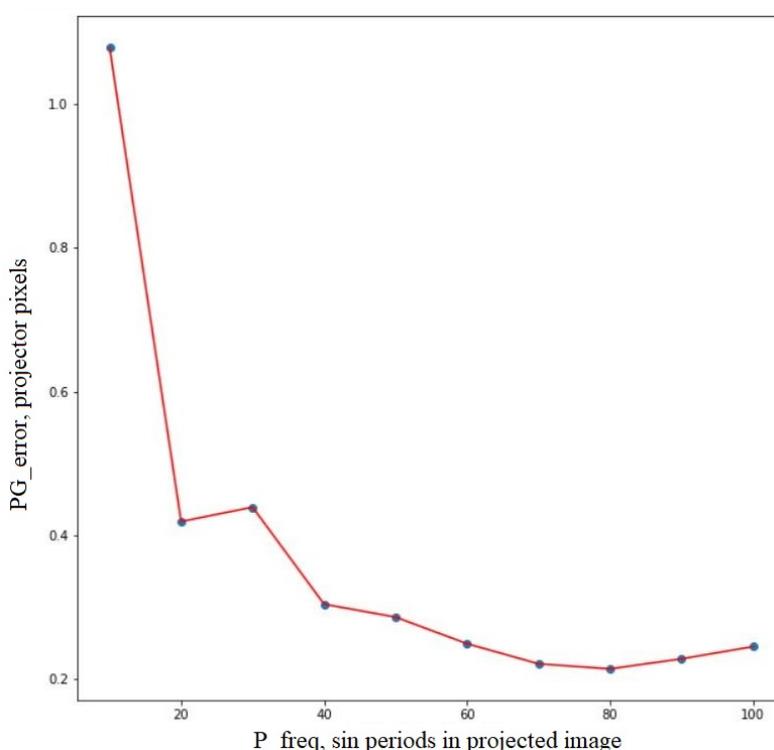


Рис. 2. Анализ зависимости ошибки комбинации фазового и Грей кодирования от частоты модулирующего сигнала: PG_error - погрешность комбинации фазового и Грей кодирования; P_freq – частота модулирующего сигнала

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меледин В.Г. Оптоэлектронные информационные системы для науки и промышленности // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т.5. – №1. – С. 3–12.

2. Чугуй Ю.В. Трехмерные оптико-электронные измерительные системы и лазерные технологии для научных и промышленных применений // *Автометрия*. – 2015. – Т. 51. – № 4. – С. 76–91.
3. Gorthi S.S. Fringe projection techniques: Whither we are? / S.S. Gorthi, P. Rastogi // *Optics and Lasers in Engineering* 48 (2010). – P. 133–140.
4. Dvoynishnikov S.V., Rakhmanov V.V., Kabardin I.K., Meledin V.G. Phase triangulation method with spatial modulation frequency optimization // *Measurement*, Vol.145 (2019). – P. 63–70.
5. Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Анализ точности определения полной разности фаз в целочисленных интерферометрах // *Автометрия*. – 1992. – № 6. – С. 24–30.
6. Meledin, V.G. Informatics of optoelectronic measurements: Science and innovative industrial technologies // *J. Engin. Thermophys.* 18, (2009). – P. 99–128.
7. Двойнишников С.В., Куликов Д.В., Меледин В.Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного восстановления профиля поверхности трехмерных объектов сложной формы // *Метрология*. – 2010. – № 4. – С. 15–27.
8. Dvoynishnikov S.V., Semenov D.O., Rahmanov V.V., Meledin V.G., Sadbakov O.Yu. Software And Hardware System For Diagnosing Deposits Inside The Vortex Chamber // 2021 30th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE Kyoto 20–23 June 2021.
9. Kabardin I., Dvoynishnikov S., Gordienko M., Kakaulin S., Ledovsky V., Gusev G., Zuev V., Okulov V. Optical Methods for Measuring Icing of Wind Turbine Blades // *Energies* 2021, 14, 6485.
10. Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Кабардин И.К., Куликов Д.В., Меледин В.Г. оптоэлектронный метод бесконтактного измерения профиля поверхности крупногабаритных объектов сложной формы // *Измерительная техника*. – 2016. – № 1. – С. 17–21.
11. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Щепихин И.В., Кабардин И.К., Куликов Д.В. Способ измерения трехмерной геометрии выпуклых и протяженных объектов // Патент на изобретение RU 2708940 С1, 12.12.2019.

© В. О. Зувев, С. В. Двойнишников, И. К. Кабардин, В. Г. Меледин, 2022