

В. О. Зуев^{1,2}, С. В. Двойнишников², В. Г. Главный², В. В. Рахманов²*

Автоматизированный поиск оптимальных параметров оптических элементов системы измерения трехмерной геометрии объекта методом фазовой триангуляции

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 предложен метод автоматизированного поиска оптимальных параметров оптических элементов системы измерения трехмерной геометрии объекта с использованием фазовой триангуляции. Он включает в себя два алгоритма: поиск оптимальных параметров фотоприемника и поиск оптимальной частоты фазовой модуляции. Предложенные методы реализованы в виде автоматизированного программного модуля, реализующего автоматический поиск оптимальных параметров оптических элементов измерительного комплекса. В работе показаны результаты экспериментального тестирования предложенного метода. Демонстрировано, что реализованный автоматизированный алгоритм обеспечил полностью автоматический подбор оптимальных параметров измерительной системы и позволил выполнять дальнейшие измерения с погрешностью менее 0,1 пикселя источника структурированной засветки.

Ключевые слова: фазовая триангуляция, параметры фотоприемника, трехмерная геометрия

V. O. Zuev^{1,2}, S. V. Dvoynishnikov², V. G. Glavny², V. V. Rakhmanov²*

Automated Search for Optimum Parameters of Optical Elements of a System for Measuring 3D Geometry of an Object by the Phase Triangulation Method

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 proposes a method for automated search for the optimal parameters of optical elements of a system for measuring the three-dimensional geometry of an object using phase triangulation. It includes two algorithms: the search for the optimal parameters of the photodetector and the search for the optimal frequency of phase modulation. The proposed methods are implemented in the form of an automated software module that implements an automatic search for the optimal parameters of the optical elements of the measuring complex. The paper shows the results of experimental testing of the proposed method. It is demonstrated that the implemented automated algorithm provided a fully automatic selection of the optimal parameters of the measuring system and made it possible to perform further measurements with an error of less than 0,1 pixel of the structured light source.

Keywords: phase triangulation, photodetector parameters, 3D geometry

Введение

Современные оптические методы измерения трехмерной геометрии объектов активно используются в различных практических приложениях науки и промышленности [1–2]. Очевидно, что для достижения максимальной эффективности измерительной системы необходимо определение оптимальных параметров оптических элементов. Особо остро данная проблема стоит в методах фазовой триангуляции и структурированного освещения [3]. С одной стороны, развитие этих методов нацелено на достижение инвариантности к светорассеивающим свойствам измеряемой поверхности [4–5], а с другой актуальна задача увеличения скорости измерений и измерение динамических поверхностей [6]. Таким образом, для систем измерения трехмерной геометрии на основе фазовой триангуляции актуальна задача поиска оптимальных параметров оптических элементов для обеспечения наилучших метрологических характеристик.

В предыдущей работе разработан полуавтоматизированный алгоритм поиска оптимальных параметров фотоприемника и частоты фазовой модуляции [7]. Однако, несмотря на надежность разработанного метода, его использование является времязатратным, требует участия оператора и не решает проблему наличия засвеченных областей, в которых результаты измерения будут некорректными. В данной работе предложен метод автоматизированного поиска оптимальных параметров оптических элементов системы измерения трехмерной геометрии объекта с использованием фазовой триангуляции. Он включает в себя два алгоритма: поиск оптимальных параметров фотоприемника и поиск оптимальной частоты фазовой модуляции.

Автоматизация поиска оптимальных параметров фотоприемника

Для минимизации погрешности измерения трехмерной геометрии контролируемого объекта требовалось оптимизировать параметры фотоприемника: экспозицию, усиление, яркость, контраст. Для автоматизации данного процесса были разработаны критерии качества настройки фотоприемника.

1. Обеспечение максимального динамического диапазона D_{cam} фотоприемника для уменьшения погрешности расшифровки фазовых изображений (рис. 1):

$$D_{cam} = I_{white} - I_{black}, \quad (1)$$

где I_{white} – регистрируемая фотоприемником интенсивность при проецировании проектором равномерной белой засветки; I_{black} – регистрируемая фотоприемником интенсивность при проецировании проектором равномерной черной засветки. Расчет регистрируемой фотоприемником интенсивности I_{reg} производится путем усреднения значений $I_{i,j}$ по матрице фотоприемника:

$$I_{reg} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I_{i,j}}{NM}. \quad (2)$$

2. Минимизация количества засвеченных областей на зарегистрированном изображении, где интенсивность регистрируемого излучения близка к максимальной.

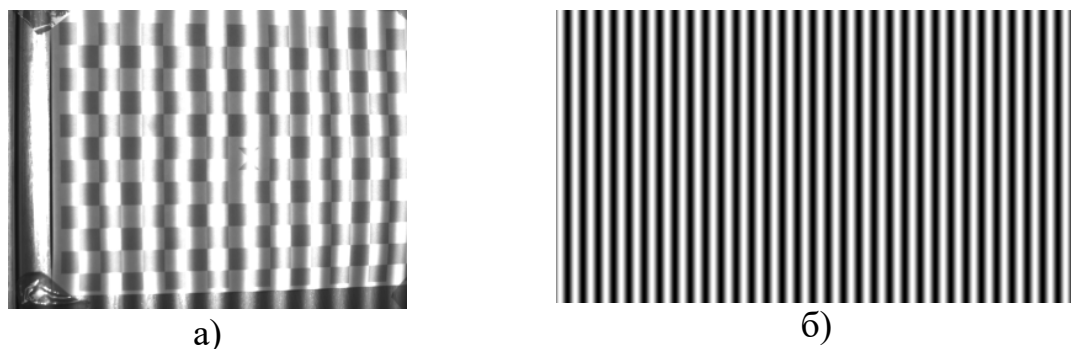


Рис. 1. Метод фазовых шагов: а) регистрируемое фотоприемником изображение; б) проецируемое проектором фазовое изображение

Для минимизации количества засвеченных областей фотоприемника введен штраф, пропорциональный количеству пикселей матрицы фотоприемника, где регистрируемая интенсивность $I_{i,j} > threshold$, соответствующим настройкам фотоприемника. Для этого был модифицирован алгоритм расчета I_{white} :

$$I_{white} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \begin{cases} I_{i,j}, & \text{if } I_{i,j} < threshold \\ 0, & \text{if } I_{i,j} \geq threshold \end{cases}}{NM}. \quad (3)$$

Таким образом, данный метод искусственно занижает рассчитываемый динамический диапазон D_{cam} для тех настроек фотоприемника, при которых области контролируемого объекта регистрируются, как засвеченные.

Для автоматизированного поиска оптимальных параметров фотоприемника, обеспечивающих максимальный динамический диапазон, были рассмотрены следующие подходы: градиентный спуск; дихотомия; итеративное разбиение интервала поиска оптимальных параметров на равномерные участки с последующим сужением интервала поиска до участка с текущим максимумом целевой функции. Так как градиентный спуск требует введения гиперпараметров, что снижает его надежность, а метод дихотомии требует непрерывности целевой функции, что не гарантируется из-за модифицированного расчета I_{white} , то был выбран последний подход.

В результате разработан алгоритм автоматизированного поиска оптимальных параметров фотоприемника (рис. 2): экспозиции, усиления, яркости, контраста:

1) задается количество итераций K разбиения интервала поиска оптимальных параметров фотоприемника на равномерные участки с последующим сужением интервала поиска до участка с текущим максимумом D_{cam} ;

2) задаются массивы $exposure[K]$, $gain[K]$, $brightness[K]$, $contrast[K]$ с количеством разбиений интервала поиска оптимальных параметров для каждой итерации сужения интервала поиска. Если оптимизация параметра не требуется, то $arr[k] = 1$, $k = 1...K$;

3) на каждой k -ой итерации текущие интервалы значений экспозиции, усиления, яркости, контраста разбиваются на количество интервалов $exposure[K]$, $gain[K]$, $brightness[K]$, $contrast[K]$, соответственно. Для всех комбинаций экспозиции, усиления, яркости, контраста, соответствующих середине интервала, производится расчет динамического диапазона D_{cam} , и в соответствии с достигнутым максимумом обновляются интервалы поиска настроек фотоприемника.



Рис 2. Схема автоматизированного поиска оптимального значения параметра фотоприемника с итеративным разбиением и сужением интервала поиска

Автоматизация поиска оптимальной частоты фазовой модуляции

Для минимизации погрешности измерения трехмерной геометрии контролируемого объекта требовалось оптимизировать частоту фазовой модуляции, увеличение которой с одной стороны ограничено резкостью проецируемого и регистрируемого изображения, но с другой целесообразно, так как погрешность измерения координаты Z (глубины сцены) согласно [8–9] обратно пропорциональна частоте пространственной модуляции излучения:

$$\Delta z = \frac{p\Delta l}{2\pi l \sqrt{N} \operatorname{tg} \theta}. \quad (4)$$

Следовательно, требовалось найти максимальное количество гармонических полос, при котором возможна расшифровка фазовых изображений (рис. 3). Так как значение искомого максимума непостоянно внутри измерительного объема, то его расчет производился на границах калибровочного объема [10].

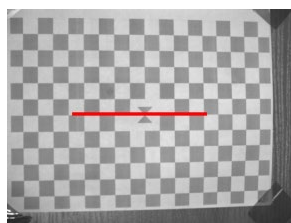


Рис. 3. Горизонтальный пиксельный срез внутри калибровочной мишени

Для оценки максимальной частоты фазовой модуляции на границе калибровочного объема использовались полученные в процессе калибровки экспериментальные данные с применением заведомо низкого количества гармонических полос (10), что не оказывало значительного негативного эффекта на итоговые калибровочные данные из-за приближенных к идеальным условиям калибровки. Алгоритм оценки максимальной частоты фазовой модуляции f_{max} на границе калибровочного объема включает следующие итерации:

1) автоматическое детектирование ключевых точек плоской калибровочной мишени; выбор горизонтального пиксельного среза ($start, end$), лежащего внутри области ключевых точек (рис. 3);

2) анализ разности между результатами обработки бинарных кодов Грея G и комбинации бинарных кодов Грея и фазовых шагов PG вдоль выбранного пиксельного среза (рис. 4, а, б); оценка погрешности расшифровки структурированных изображений:

$$decod_error = \max_{i=start..end} (G[i] - PG[i]) - \min_{i=start..end} (G[i] - PG[i]); \quad (5)$$

3) оценка максимальной частоты фазовой модуляции f_{max} :

$$f_{max} = \frac{proj_width}{8 \cdot decod_error}, \quad (6)$$

где $proj_width$ – горизонтальное разрешение проектора.

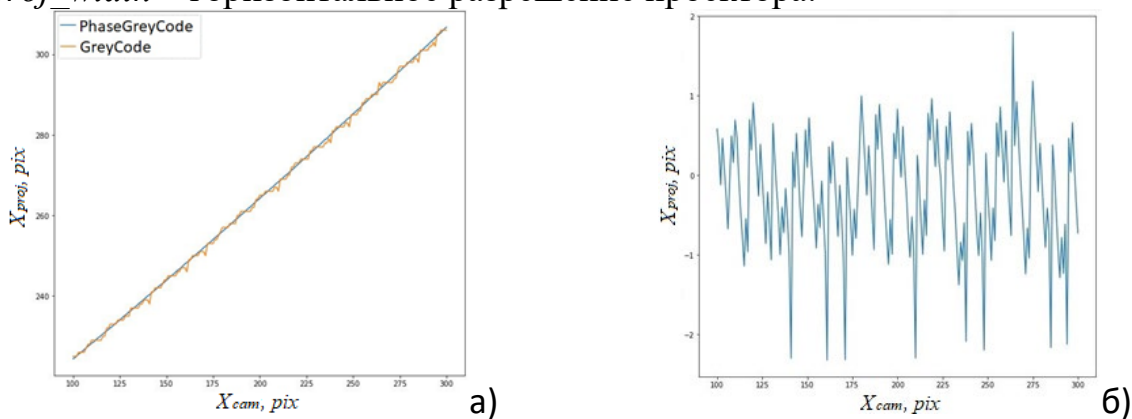


Рис 4. Анализ расшифрованных данных вдоль пиксельного среза: а) бинарный код Грея и его комбинация с методом фазовых шагов; б) их алгебраическая разность

Экспериментальные результаты

Проведено тестирование разработанного метода поиска оптимальных параметров фотоприемника. В процессе тестирования использовалась система измерения трехмерной геометрии объекта методом фазовой триангуляции (рис. 5), состоящая из проектора TouYinGer Q10W с разрешением 1920×1080 и световым

потоком 9500 лм с доработанной оптической системой для формирования резкого изображения на расстоянии 55 см, фотоприемника Imaging Source DMK 72BUC02, компьютера Honor MagicBook Pro. В качестве измерительного объекта использовалась плоская поверхность с неоднородным цветовым покрытием.

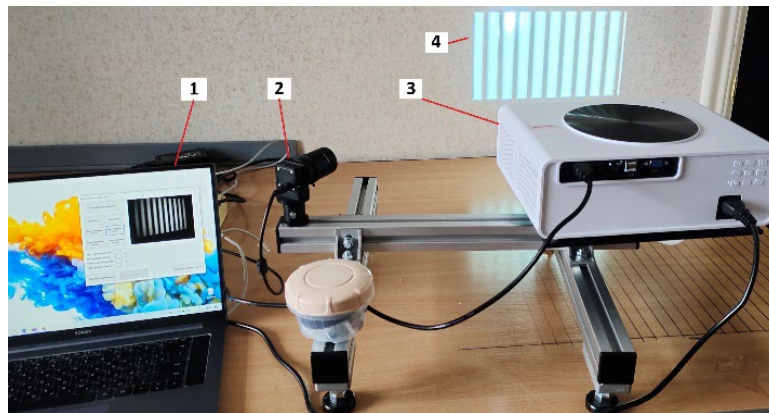


Рис. 5. Система измерения трехмерной геометрии объекта методом фазовой триангуляции: 1 – компьютер; 2 – фотоприемник; 3 – проектор; 4 – объект

Произведен подбор оптимальной экспозиции фотоприемника. Для усиления, яркости, контраста установлены значения по умолчанию: 0, 0, 4, соответственно. Величина начального интервал поиска экспозиции составляла 0,019 сек. Массив разбиений интервала поиска установлен $exposure[3] = \{10,10,15\}$, что соответствует погрешности поиска оптимального значения экспозиции $\sim 10^{-5}$ сек. Найденное значение оптимальной экспозиции составило 0,00105 сек. Время поиска составило 38 сек.

Выполнено измерение трехмерной геометрии плоской поверхности с неоднородным цветовым покрытием. Произведен анализ экспериментальных данных вдоль пиксельного среза центральной области изображения фотоприемника. Динамический диапазон фотоприемника составил 51–74 % от максимального (рис. 6, а). Засвеченные области отсутствуют. Амплитуда высокочастотной компоненты расшифрованной комбинации бинарных кодов Грея и фазовых шагов вдоль пиксельного среза на уровне 0,1 пиксель (рис. 6, б).



Рис 6. Анализ экспериментальных данных вдоль горизонтального пиксельного среза: а) нелинейность интенсивности; б) высокочастотная компонента комбинации бинарных кодов Грея и фазовых шагов

Заключение

В результате предложен метод автоматизированного поиска оптимальных параметров оптических элементов системы измерения трехмерной геометрии объекта с использованием фазовой триангуляции. Он включает в себя два алгоритма: поиск оптимальных параметров фотоприемника и поиск оптимальной частоты фазовой модуляции. Предложенные методы реализованы в виде автоматизированного программного модуля, реализующего автоматический поиск оптимальных параметров оптических элементов измерительного комплекса. В работе показаны результаты экспериментального тестирования предложенного метода. Продемонстрировано, что реализованный автоматизированный алгоритм обеспечил полностью автоматический подбор оптимальных параметров измерительной системы и позволил выполнять дальнейшие измерения с погрешностью менее 0,1 пикселя источника структурированной засветки. Такой уровень погрешности соответствует погрешности измерений лучше, чем 0,1%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чугуй, Ю. В. Фурье-оптика протяженных объектов постоянной толщины // Новосибирск: НГТУ, 2021. – 456 с.
2. Меледин, В. Г. Оптоэлектронные информационные системы для науки и промышленности // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т. 5, № 1. – С. 3–12.
3. Gruber M., Hausler G., Simple, robust and accurate phase-measuring triangulation, *Optik*, 1992, vol. 3, pp. 118–122.
4. 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. 17–22.
5. Двойнишников С.В., Бакакин Г.В., Главный В.Г., Кабардин И.К., Меледин В.Г. Способ триангуляционного измерения толщины листовых изделий // Патент РФ на изобретение № 2537522, приоритет 01.07.2013, опубликовано 10.01.2015, бюл. №1.
6. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Павлов В.А. Высокоскоростная обработка фазовых изображений с использованием параллельных вычислений // Автометрия. – Т.53, №2. – 2017. – С. 56–62.
7. Зуев В. О., Двойнишников С. В., Кабардин И. К., Меледин В. Г. Система измерения трехмерной геометрии методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея: программный комплекс для настройки // Измерительная техника. – 2022. – № 8. – С. 46–51.
8. Гужов В. И., Солодкин Ю. Н. Анализ точности определения полной разности фаз в целочисленных интерферометрах // Автометрия. – 1992. – № 6. – С. 24–30.
9. 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.
10. Зуев В.О., Двойнишников С.В., Кабардин И.К., Рахманов В.В. Метод калибровки измерителя на основе фазовой триангуляции для измерений в условиях ограниченного объема с преломлением оптических сигналов // Сборник материалов Международной научной конференции «Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2022». – Новосибирск: СГУГиТ, 2022. – № 1. – С. 86–93.

© В. О. Зуев, С. В. Двойнишников, В. Г. Главный, В. В. Рахманов, 2023