

Система измерения трехмерной геометрии объекта методом фазовой триангуляции: автоматизированная калибровка параллельными сдвигами плоской мишени

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 представлена автоматизированная калибровка системы измерения трехмерной геометрии объекта методом фазовой триангуляции на основе параллельных сдвигов плоской калибровочной мишени. Для восстановления соответствия между координатами матрицы фотоприемника и трехмерными координатами объекта поверхность калибровочной мишени имеет изображение с периодичной структурой и уникальным центральным элементом. В процессе итеративных перемещений калибровочной мишени вдоль измерительного объема поддержан автоматический поиск ключевых точек на изображении фотоприемника и восстановление их пространственных координат. С помощью кросс-корреляционного анализа локальной области изображения для каждой ключевой точки реализовано уточнение ее положения до десятых долей пикселя. Выполнено тестирование разработанного метода калибровки на системе измерения трехмерной геометрии наледи в процессе аэродинамических исследований на климатической аэродинамической трубе. Достигнута погрешность измерения трехмерной геометрии плоского объекта 9 мкм в измерительном объеме 100 x 100 x 60 мм³.

Ключевые слова: автоматизация калибровки, фазовая триангуляция, ключевые точки

V. O. Zuev^{1,2}, S. V. Dvoynishnikov¹, V. A. Pavlov², D. V. Kulikov²*

Object Three-Dimensional Geometry Measurement System by the Phase Triangulation: an Automated Calibration Based on Parallel Shifts of a Plane Target

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 an automated calibration method based on parallel shifts of a plane calibration target for a three-dimensional object geometry measurement system. To restore the correspondence between photodetector matrix and object three-dimensional coordinates, the calibration target surface has an image with a periodic structure and a unique central element. During iterative calibration target movements along measuring volume, an automated key points search and their spatial coordinates restore are supported. With the help of cross-correlation analysis of key point local image area its position is refined to tenths of a pixel. The developed calibration method was tested on the ice three-dimensional geometry measurement system in aerodynamic studies on a climatic wind tunnel. The flat object three-dimensional geometry measurement error of 9 microns has been achieved in the measurement volume of 100 x 100 x 60 mm³.

Keywords: calibration automatization, phase triangulation, key points

Введение

Метод фазовой триангуляции получил широкое применение в различных научно-технических задачах измерения и контроля трехмерной геометрии объекта в областях ветроэнергетики [1], гидроэнергетики [2], горячей металлургии [2, 3]. К основным преимуществам данного измерительного метода относят: бесконтактную неразрушающую измерительную технологию, высокую точность и скорость измерения, возможность контроля геометрии динамично движущегося объекта, доступность комплектующих.

В предыдущей работе, благодаря разработанному методу калибровки [4], измерительная технология на основе фазовой триангуляции была адаптирована для измерения трехмерной геометрии объекта, помещенного в ограниченный объем с преломлением оптических сигналов. В результате появилась возможность проведения научных исследований по анализу изменения трехмерной геометрии объекта, помещенного в объем с моделируемыми условиями [5].

Разработанный метод калибровки предполагает восстановление в каждом пикселе матрицы фотоприемника взаимно-однозначного соответствия между регистрируемой фазой гармонических полос и трехмерными координатами объекта с помощью построения регрессионных калибровочных кривых. Данный факт объясняет необходимость увеличения количества калибровочных итераций для увеличения детализации калибровочных кривых. При этом на каждой итерации требуется определить положения и пространственные координаты ключевых точек на изображении фотоприемника. В результате ручная обработка калибровочных данных становится времязатратной и трудоемкой, и возрастает актуальность автоматизации данного процесса.

На данный момент разработано большое количество методов детектирования ключевых точек нанесенной на объект периодичной структуры [6–11]. Достигнута погрешность определения их положения до десятых долей пиксела. Данные методы работают как на основе классических алгоритмов обработки изображений [6–8], так и на основе алгоритмов машинного обучения [9, 10]. Однако, несмотря на существенный прогресс в данной области, при попадании в кадр только внутренней области периодичной структуры данные методы становятся неприменимы из-за неоднозначности определения пространственных координат ключевых точек. Существующим решением данной проблемы является нанесение на калибровочную поверхность изображения ChArUco с уникальным кодированием каждого элемента периодичной структуры [11]. Однако применение паттернов ArUco может оказаться неэффективным в случае низкого разрешения изображения фотоприемника, например, при скоростных измерениях геометрии объекта.

Данная работа посвящена автоматизации калибровки параллельными сдвигами плоской мишени системы измерения трехмерной геометрии объекта методом фазовой триангуляции.

Алгоритм поиска ключевых точек плоской калибровочной мишени

В качестве калибровочной мишени используется плоская поверхность с нанесенным на нее изображением периодической структуры и уникальным центральным элементом (рис. 1, а). Ключевыми точками являются центральный элемент и узлы периодической структуры. Наличие уникального центрального элемента решает проблему неоднозначного определения пространственных координат ключевых точек. Предполагается наличие центрального элемента в кадре на протяжении всей калибровки, что является оправданным, т.к. в противном случае из-за значительного сдвига калибровочной поверхности на определенных итерациях калибровки в части пикселей матрицы фотоприемника будут отсутствовать экспериментальные данные, что усложнит построение калибровочных регрессионных кривых.

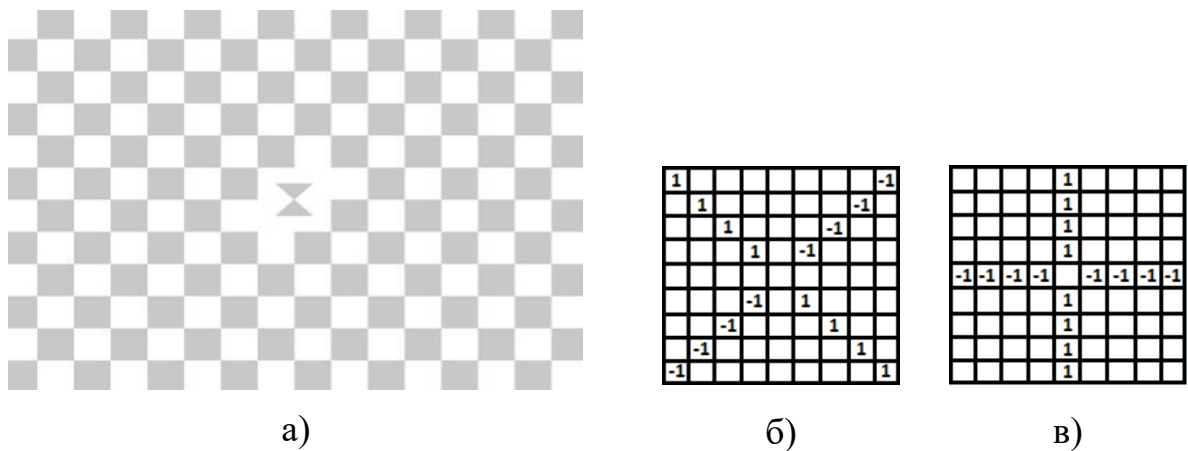


Рис 1. Устройство калибровочной мишени: а) изображение; б) ядро для поиска узлов периодической структуры; в) ядро для поиска центрального элемента

Для детектирования ключевых точек используются устойчивые к поворотам ядра (рис. 1, б, в). Потенциально для поиска ключевых точек могут применяться два подхода: на основе кросс-корреляционного анализа и на основе бинаризации. Кросс-корреляционный метод предполагает свертку ядра с нормированным изображением фотоприемника и поиск максимумов кросс-корреляции:

$$g(x, y) = \sum_{\Delta x=-h}^h \sum_{\Delta y=-h}^h W(\Delta x, \Delta y) f(x - \Delta x, y - \Delta y), \quad (1)$$

где (x, y) – координаты анализируемого пиксела, $2h + 1$ – размер ядра, W – ядро, f – изображение фотоприемника, приведенное к диапазону от -1 до 1 , g – результат свертки.

Однако, из-за того, что количество ключевых точек, попавших в кадр, неизвестно, для их поиска необходимо вводить гиперпараметр *threshold* и считать

ключевыми точками те области (x, y) , где $g(x, y) > threshold$. Зависимость качества калибровки от гиперпараметра $threshold$ не позволяет считать ее надежной и полностью автоматизированной.

Поэтому для поиска ключевых точек используется подход на основе бинаризации изображения фотоприемника:

$$b(x, y) = \begin{cases} 1, & img(x, y) \geq cur_median \\ -1, & img(x, y) < cur_median \end{cases} \quad (2)$$

где (x, y) – координаты анализируемого пиксела; img – изображение фотоприемника; cur_median – медианное значение изображения фотоприемника в диапазоне пикселей: по оси X от $x - half_bin_filter_size$ до $x + half_bin_filter_size$, по оси Y от $y - half_bin_filter_size$ до $y + half_bin_filter_size$. Области бинаризованного изображения, полностью совпадающие с ядром, соответствуют ключевым точкам. Вероятность детектирования области, не являющейся ключевой точкой, составляет:

$$P_{error} = \frac{1}{2^{2(filter_size-1)}}, \quad (3)$$

где $filter_size$ – размер ядра.

В результате разработан алгоритм автоматизированного поиска ключевых точек плоской калибровочной мишени:

1) поиск оптимального размера бинаризирующего фильтра:

$$bin_filter_size = \underset{f_size=3,5,7,\dots}{arrg \max} \ len(find_chess_corners(bin_img(img, f_size))), \quad (4)$$

где img – исходное изображение фотоприемника; bin_img – функция бинаризации изображения с размером фильтра f_size ; $find_chess_corners$ – функция поиска массива ключевых точек на бинаризованном изображении; len – функция расчета длины массива;

2) бинаризация изображения фотоприемника найденным фильтром;

3) поиск совпадений ядра с областями бинаризованного изображения, детектирование ключевых точек;

4) оценка периода калибровочного паттерна;

5) фильтрация ключевых точек на основе рассчитанной оценки периода калибровочного паттерна (рис. 2);

6) поиск центрального элемента с помощью кросс-корреляции.

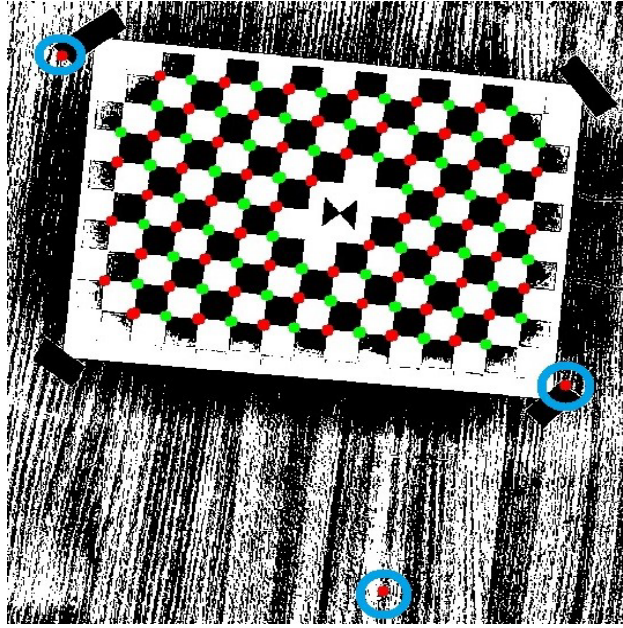


Рис. 2. Фильтрация ключевых точек

Восстановление пространственных координат найденных ключевых точек происходит по следующему алгоритму:

1) поиск двух ближайших ключевых точек к центральному элементу по вертикали и горизонтали, экстраполяция положения первого слоя ближайших к центральному элементу ключевых точек;

2) поиск первого слоя ближайших к центральному элементу ключевых точек;

3) восстановление на основе первого слоя ближайших к центральному элементу ключевых точек функции преобразования координат периодичной структуры калибровочной мишени в пиксельные координаты фотоприемника $T(X, Y) = (x, y)$:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_0 X + c_1 Y + c_2 XY + c_3 X^2 + c_4 Y^2 \\ C_0 X + C_1 Y + C_2 XY + C_3 X^2 + C_4 Y^2 \end{pmatrix}; \quad (5)$$

4) восстановление пространственных координат (X_{3D}, Y_{3D}) найденных ключевых точек (x_i, y_i) калибровочной мишени:

$$\begin{pmatrix} X_{3D} \\ Y_{3D} \end{pmatrix} = \left(\frac{h_{period}}{2}, \frac{v_{period}}{2} \right) \cdot \arg \min_{X, Y} (\|T(X, Y) - (x_i, y_i)\|_2), \quad (6)$$

где h_{period} , v_{period} – физические размеры периода изображения плоской калибровочной мишени по горизонтали и вертикали, соответственно.

Субпиксельное детектирование ключевых точек калибровочной мишени

Так как в случае скоростных измерений трехмерной геометрии объекта используются камеры с низким разрешением, то погрешность определения координат фотоприемника ключевых точек в 1 пиксель становится существенным ограничением точности калибровки.

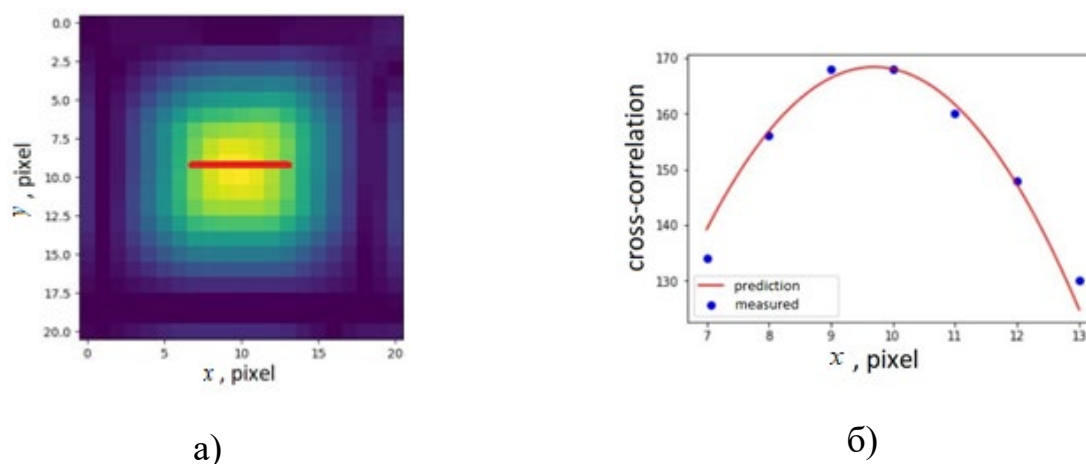


Рис 3. Анализ локальной области ключевой точки: а) горизонтальный пиксельный срез; б) аппроксимация квадратичной функцией значений кросс-корреляции вдоль горизонтального пиксельного среза

Для решения данной проблемы разработан специальный метод уточнения координат фотоприемника ключевой точки калибровочной мишени до десятых долей пиксела. Алгоритм работы метода основан на анализе локальной области ключевой точки на изображении фотоприемника после применения кросс-корреляции с ядром (рис. 1, б). Анализируются горизонтальный (рис. 3, а) и вертикальный пиксельные срезы, проходящие через положение ключевой точки. С помощью аппроксимации квадратичной функцией значений кросс-корреляции (рис. 3, б) уточняется положение ключевой точки, соответствующее вершине аппроксимирующей функции.

Экспериментальные результаты

Произведено тестирование разработанного метода автоматизированной калибровки на системе измерения трехмерной геометрии наледи в процессе аэродинамических исследований в климатической аэродинамической трубе. Измерительная система (рис. 4) включала фотоприемник Imaging Source DMK 33GX264 с объективом Imaging Source TCL 5026 5MP, цифровой проектор Excelvan CL720

с разрешением 1280x800 и световым потоком 3000 лм с доработанной оптической системой для формирования резкого изображения на расстоянии 60–80 см. Расстояния от источника и приемника освещения до объекта составили 60 см и 125 см, соответственно. Угол между оптическими осями источника и приемника оптического излучения составил 70° . Измерительный объект помещался в трубу из оргстекла с поперечным сечением $200 \times 200 \text{ мм}^2$ и толщиной стенок 20 мм.

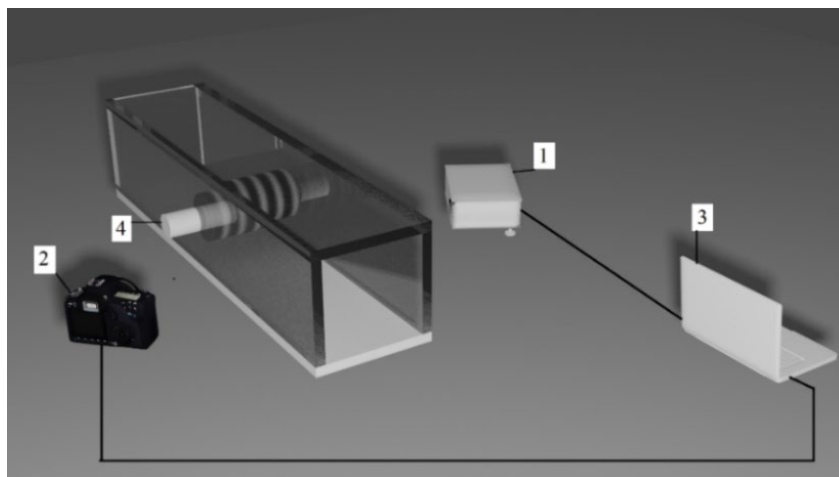


Рис. 4. Схема системы измерения трехмерной геометрии наледи в климатической аэродинамической трубе: 1 – проектор, 2 – фотоприемник, 3 – компьютер, 4 – объект

Калибровка измерительной системы произведена параллельными сдвигами плоской мишени, заведенной через конец аэродинамической трубы. Калибровочный объем составил $100 \times 100 \times 60 \text{ мм}^3$. Погрешность измерения откалиброванной измерительной системой трехмерной геометрии плоского объекта составила 9 мкм.

Заключение

В работе предложен метод автоматизированной калибровки системы измерения трехмерной геометрии объекта методом фазовой триангуляции на основе параллельных сдвигов плоской калибровочной мишени вдоль измерительного объема. Разработан устойчивый к шумам алгоритм поиска и восстановления пространственных координат ключевых точек плоской калибровочной мишени. Решена проблема неоднозначности определения пространственных координат ключевых точек с помощью нанесения на калибровочную поверхность изображения с периодической структурой и уникальным центральным элементом. Разработан алгоритм субпиксельного уточнения положения ключевых точек, что делает возможным применение разработанного метода калибровки в случае низкого разрешения изображения фотоприемника. Выполнено тестирование разработанного метода калибровки на системе измерения трехмерной геометрии наледи в процессе аэродинамических исследований на климатической аэродина-

мической трубе. Достигнута погрешность измерения трехмерной геометрии плоского объекта 9 мкм в измерительном объеме 100 x 100 x 60 мм³. Предложенный метод калибровки применим в произвольных условиях ограничивающего объема с преломлением оптических сигналов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. – P. 1–14.
2. Dvoynishnikov S.V., Kabardin I.K., Meledin V.G. Advanced phase triangulation methods for 3D shape measurements in scientific and industrial applications // *Machine Vision and Navigation*. – 2020. – P. 675–709.
3. Двойнишников С.В. Многопараметрическая триангуляция геометрии динамических объектов в фазово-неоднородных средах: дисс. ... доктора техн. наук: 05.13.18. – ИАиЭ СО РАН. – Новосибирск. – 2016. – С. 317–359.
4. 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 // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2022. – Т. 8, № 1. – С. 86–93.
5. Зуев В.О., Двойнишников С.В., Рахманов В.В., Садбаков О.Ю. Измерение геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов // *Сборник тезисов VII Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (ТФГ2022) с элементами школы молодых ученых, Сочи, 5–14 сентября 2022 г.* – С. 204.
6. Zhang Q., Xiong C. A New Chessboard Corner Detection Algorithm with Simple Thresholding // *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*. – 2017. – P. 532–542.
7. Dan X., Gong Q., Zhang M., Li T., Li G., Wang Y. Chessboard Corner Detection Based on EDLines Algorithm. *Sensors (Basel)*. – 2022. – P. 1–14.
8. Liu Y., Liu S., Cao Y., Wang Z. Automatic chessboard corner detection method // *IET Image Processing*. – 2016. – P. 16–23.
9. Chen B., Xiong C., Zhang Q. CCDN: Checkerboard Corner Detection Network for Robust Camera Calibration // *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*. – 2018. – P. 324–334.
10. Wang G., Zheng H., Zhang X. A Robust Checkerboard Corner Detection Method for Camera Calibration Based on Improved YOLOX // *Front. Phys.* 9:819019. 2022. DOI: 10.3389/fphy.2021.819019.
11. An G.H., Lee S., Seo M-W, Yun K., Cheong W-S, Kang S-J. Charuco Board-Based Omnidirectional Camera Calibration Method // *Electronics*. 2018. <https://doi.org/10.3390/electronics7120421>.

© В. О. Зуев, С. В. Двойнишников, В. А. Павлов, Д. В. Куликов, 2023