

С. В. Двойнишников^{1}, В. А. Павлов¹, В. О. Зуев¹, Д. А. Ланшаков¹*

Метод фазовой триангуляции и структурированного освещения для измерения трехмерной геометрии в условиях динамических помех

¹Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: dv.s@mail.ru

Аннотация. В работе предложен метод фазовой триангуляции для измерения трехмерной геометрии сложнопрофильных объектов в условиях динамических помех. Метод основан на статистическом анализе экспериментальных данных, адаптивной фильтрации и применении управляемого источника структурированной засветки. Метод позволяет снизить погрешность измерения трехмерной геометрии поверхности сложнопрофильных объектов методами фазовой триангуляции.

Ключевые слова: фазовая триангуляция, динамические помехи, трехмерная геометрия

S. V. Dvoynishnikov^{1}, V.A.Pavlov¹, V.O Zuev¹, D.A. Lanshakov¹*

Phase Triangulation and Structured Illumination Method for Measuring 3D Geometry under Dynamic Noise

¹ Kutateladze Institute of thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: dv.s@mail.ru

Abstract. The paper proposes a phase triangulation method for measuring the three-dimensional geometry of complex-profile objects under conditions of dynamic noise. The method is based on a statistical analysis of experimental data, adaptive filtering, and the use of a controlled source of structured illumination. The method makes it possible to reduce the error in measuring the three-dimensional geometry of the surface of complex-profile objects using phase triangulation methods.

Keywords: phase triangulation, dynamic noise, 3D geometry

Введение

Совершенствование прецизионных методов бесконтактного измерения линейных размеров имеет огромное значение в развитии многих областей науки и техники [1–3]. Для бесконтактных измерений профиля поверхности трехмерных объектов наиболее перспективными и хорошо развитыми являются триангуляционные методы, использующие структурированное освещение. Они основаны на освещении структурированным светом поверхности объекта и наблюдении с направления, отличного от направления освещения. Наблюдаемое 2D изображение, представляющее собой пространственное распределение интенсивности рассеянного объектом света, содержит искажения, кодирующие информацию о третьей координате.

Известно большое количество практических приложений оптико-цифровых триангуляционных методов для промышленных и научных применений [1]. Бо-

лее того, в литературе встречаются работы, посвященные триангуляционным измерениям в промышленных условиях [4]. Тем не менее, в существующих разработках триангуляционные методы применяют в специфических условиях, близких к лабораторным за счет применения малых измерительных баз, дистанцирования измерительных стендов от производственных помещений и создания комфортных условий работы.

Известно большое количество работ, посвященных оптико-цифровым триангуляционным методам с использованием структурированного освещения и фазовой триангуляции для измерения трехмерной геометрии поверхности объектов сложной формы [5–8]. Большое количество работ посвящено вопросам калибровки измерительных систем [9–10], вопросам оптимизации времени измерения и обработки данных [11–12], а так же вопросам практической реализации и применения [13–14].

Тем не менее, научно-техническая проблема создания цифровых оптических методов измерений трехмерной геометрии крупногабаритных объектов, применимых в промышленности, в настоящее время не решена в полной мере. Существующие высокоточные измерительные системы требуют практически лабораторных условий использования, накладывают жесткие требования к светорассеивающим свойствам поверхности измеряемого объекта, ее трехмерному профилю и условиям внешнего освещения, в которых выполняются измерения [1]. К примеру, солнечный свет будет вносить динамические помехи в измерительный тракт, если выполнять измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов в переменную облачную погоду. Это связано с тем, что солнечное излучение, рассеиваемое облаками, вносит трудно прогнозируемые помехи в наблюдаемое распределение интенсивности рассеиваемого излучения на поверхности измеряемого объекта. С другой стороны, измерения в промышленном помещении также усложняются влиянием динамических помех, обусловленных используемым искусственным освещением, характеристики которого, как правило, специально не изучаются. Кроме того, в зависимости от перемещений изделий и оборудования в цехе, структура света, рассеиваемого на измеряемой поверхности, может кардинально изменяться. Это приводит к тому, что в зависимости от параметров структурированной засветки и характеристик внешнего освещения, влияние вносимых динамических помех может быть от пренебрежимо малого до существенного, делающего невозможным проведение измерений.

Целью данной работы является развитие оптических методов измерения трехмерной геометрии сложнопрофильных объектов на основе фазовой триангуляции для обеспечения прецизионных измерений в условиях динамических помех в виде нестационарного внешнего освещения, характерного для промышленного производства.

Описание метода

В основе предлагаемого метода лежит использование избыточного количества экспериментальных данных от фотоприемников, управляемой пространственно-временной модуляции структурированного оптического источника и многомерного цифрового анализа экспериментальных данных.

В результате применения такого подхода процесс измерения можно разбить на несколько частей:

- сбор избыточного количества изображений структурированной засветки с различными фазовыми сдвигами. Значения фазовых сдвигов задаются последовательно;

- оценка параметров внешнего освещения, наблюдаемого фотоприемником. Фильтрация изображений с некорректной зарегистрированной интенсивностью;

- расчет функции распределения интенсивности в зависимости от фазового сдвига;

- вычисление фазовой картины по набору фазовых изображений;

- расчет профиля измеренной поверхности, используя калибровочные данные.

Такой подход предполагает, что в процессе измерения и в процессе оценки параметров внешнего освещения, контролируемые параметры не будут изменяться, а параметры фоновой засветки будут меняться в соответствии с нормальным распределением. Фильтрация изображений с некорректной интенсивностью предполагает статистический анализ зарегистрированных изображений и фильтрацию по критерию сигма.

Принимаемые изображения могут быть описаны следующим выражением:

$$I_n(x, y) = A(x, y)(1 + V(x, y) \cos(\varphi(x, y) + \delta_n)) + E(x, y, n), \quad n = 0..N \cdot K, \quad (1)$$

где $I_n(x, y)$ – зарегистрированное распределение интенсивности на фазовой картине; $A(x, y)$ – распределение фоновой интенсивности; $V(x, y)$ – средняя видность; $\varphi(x, y)$ – искомое распределение разности фаз, кодирующее информацию дальности объекта; δ_n – вносимый сдвиг фазы между соседними изображениями структурированной засветки; N – число сдвигов, K – число повторений.

Далее, учитывая корректность выражения:

$$\delta_n = \delta_{n+i \cdot N}, \quad n = 0..N, \quad i = 0..(K - 1), \quad (2)$$

для каждого значения $i = 0..N$ формируется набор

$$I_{nk}(x, y) = A(x, y)(1 + V(x, y) \cos(\varphi(x, y) + \delta_n)) + E(x, y, n + kN). \quad (3)$$

Вычисляем среднее и среднеквадратичное отклонение для каждого n :

$$\overline{I_n(x, y)} = \frac{\sum_{k=0}^{K-1} I_{nk}(x, y)}{K}, \quad (4)$$

$$\sigma(x, y, n) = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{K-1} (I_{nk}(x, y) - \overline{I_n(x, y)})^2}{K}}. \quad (5)$$

Определяем набор $I^*(x, y, n)$ по критерию два сигма:

$$\{I^*(x, y, n)\} = \{I_{nk}(x, y), \forall k : |I_{nk}(x, y) - \overline{I_n(x, y)}| < 2\sigma \cdot (x, y, n)\}. \quad (6)$$

Вычисляем $I_n^*(x, y)$, как математическое ожидание от множества $\{I^*(x, y, n)\}$:

$$I_n^*(x, y) = \langle I^*(x, y, n) \rangle. \quad (7)$$

Искомое распределение фазы $\varphi(x, y)$ можно найти, используя выражение:

$$\varphi(x, y) = \arctan \left(\frac{\sum_{n=0}^N I_n^*(x, y) \cos(n\delta_n)}{\sum_{n=0}^N I_n^*(x, y) \sin(n\delta_n)} \right). \quad (8)$$

Опираясь на предположение, что динамические помехи, регистрируемые на фазовых изображениях, имеют случайное распределение, можно сделать оценку, что предложенный метод позволяет снизить погрешность измерений в \sqrt{K} раз по сравнению с классическим методом фазовой триангуляции.

Практическая реализация

Для проверки работоспособности предложенного метода измерения трехмерной геометрии в условиях динамических помех проведен эксперимент, в ходе которого на измеряемую поверхность кроме структурированной засветки дополнительно проецировалось излучение со случайным распределением интенсивности. На рис.1 показана схема измерения: 1 – измеряемый объект, 2 – LED проектор, формирующий фазовые изображения по поверхности измеряемого объекта, 3 – фотоприемник, регистрирующий фазовые изображения, 4 – LED проектор, формирующий динамические помехи, регистрируемые фотоприемником.

В ходе сбора экспериментальных данных для каждого значения фазового сдвига сбор данных производился в количестве 100 изображений, которые анализировались, фильтровались, и вычислялось среднее изображение $I_n^*(x, y)$ согласно выражению (7). Далее вычислялся фазовый сдвиг для восстановления трехмерной геометрии поверхности объекта.

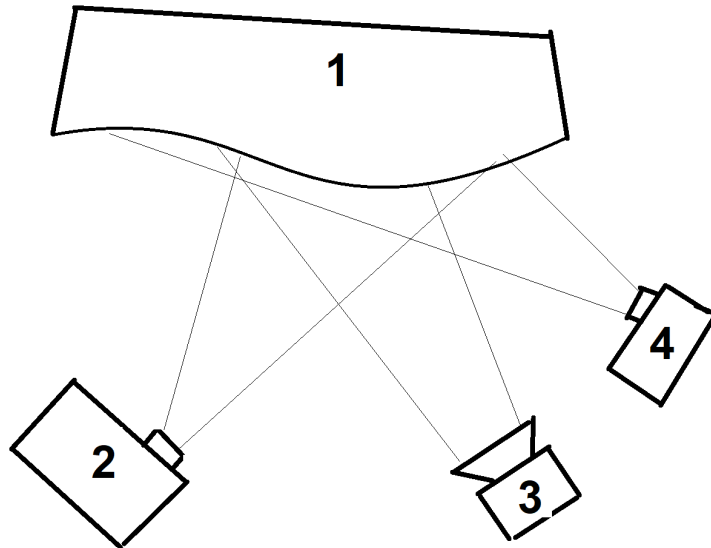


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В эксперименте использованы фотоприемники Logitech C270, анализировались изображения с разрешением 1024x768 пикселей. В качестве источника структурированной засветки использован LED проектор, обеспечивающий формирование изображения на поверхности объекта с разрешением 800x600, контрастом 800:1 и яркостью 800 люмен. Динамические помехи создавались проектором с яркостью 400 люмен, расположенным с направления, отличного от направления источника структурированной засветки и фотоприемника.

В качестве измеряемого объекта использован плоский лист картона. На рис. 2 показан пример анализируемого изображения.

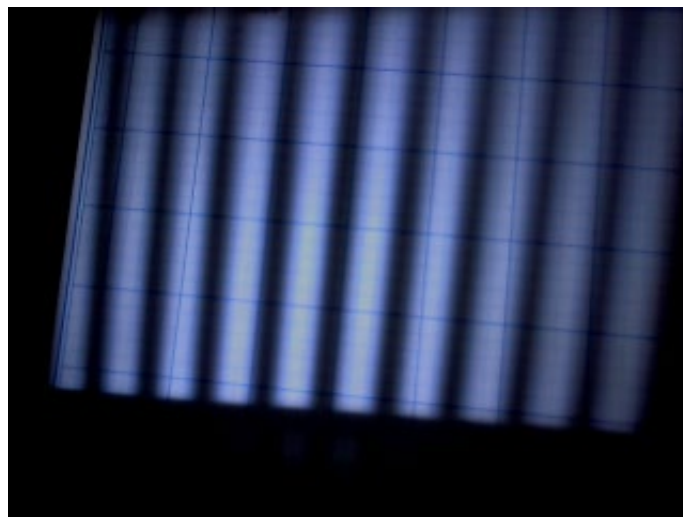


Рис. 2. Пример анализируемого изображения

На рис. 3 показана зависимость $I_{nk}(x, y)$ от k согласно выражению (3) для $x = 300, y = 400, n = 0$.

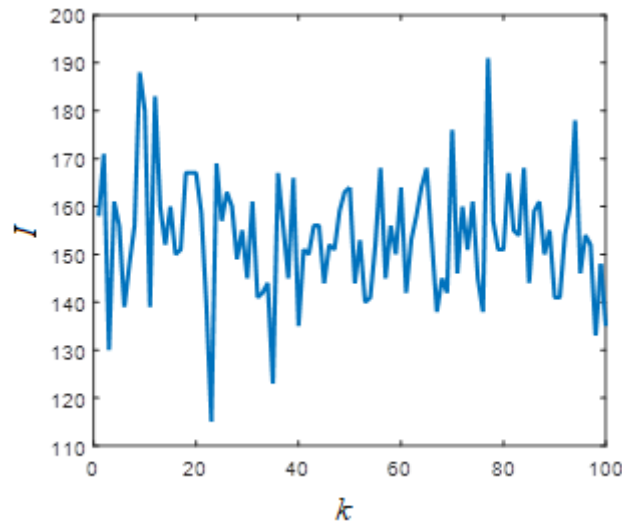


Рис.3. Зависимость наблюдаемой интенсивности в точке (300,400) при $\delta_n=0$ в условиях случайных динамических помех

В результате фильтрации по условию (6) получено распределение интенсивности $\{I^*(x, y, n)\}$. На рис. 4 показана зависимость I^* для $x = 300, y = 400, n = 0$. По оси X на графике отложен порядковый номер изображения в множестве $\{I^*(x, y, n)\}$.

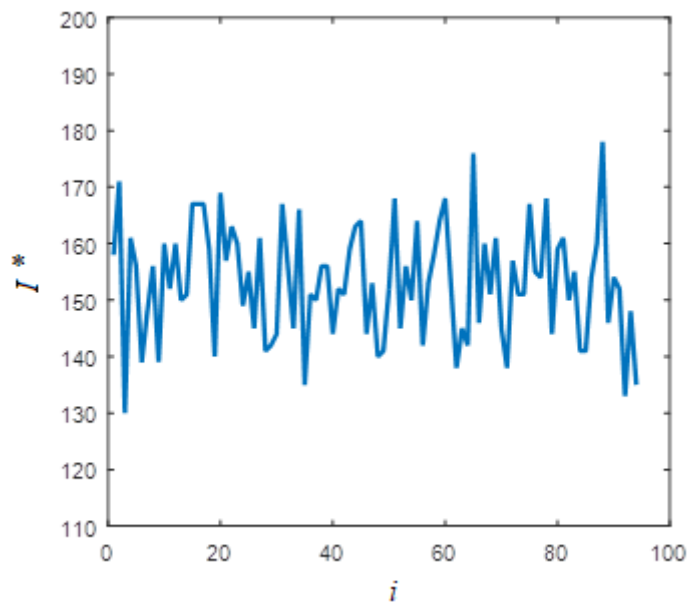


Рис.4. Зависимость наблюдаемой интенсивности в точке (300,400) при $\delta_n=0$ в условиях случайных динамических помех после фильтрации по критерию два сигма

Далее, для получения фазовой картины и трехмерного облака точек поверхности измеряемого объекта вычисляется математическое ожидание множества $\{I^*(x, y, n)\}$.

Как было сказано выше, предложенный подход позволяет снизить погрешность измерений в условиях случайных динамических помех в \sqrt{K} раз. Таким образом, в проведенном эксперименте погрешность измерения трехмерных координат снижена в 10 раз по сравнению с расшифровкой фазовых изображений классическим методом.

Заключение

В результате предложенный в рамках данной работы метод фазовой триангуляции для измерения трехмерной геометрии сложнопрофильных объектов позволяет проводить высокоточные измерения в условиях действующих промышленных технологий. Полученные технические решения отличаются универсальностью применения и могут быть применены для измерения геометрических параметров в широком спектре практических приложений в научных исследованиях и промышленных технологиях.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dvoynishnikov S.V., Kabardin I.K., Meledin V.G. (2020) Advanced Phase Triangulation Methods for 3D Shape Measurements in Scientific and Industrial Applications. In: Sergiyenko O., Flores-Fuentes W., Mercorelli P. (eds) Machine Vision and Navigation. Springer, Cham.
2. Meledin V.G. Informatics of optoelectronic measurements // (2009) Science and innovative industrial technologies, 18(2). – P. 99–128.
3. Chugui Y.V. Three-dimensional optoelectronic measurement systems and laser technologies for scientific and industrial applications // (2015) Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 51(4). – P. 385–397.
4. S.S. Gorthi, P. Rastogi, Fringe projection techniques: whither we are? Opt Lasers Eng., 48 (2010). – P. 133–140.
5. Deng F., Sze W., Deng J., Fung K.S.M., Leung W.H., Lam E.Y. Regularized multiframe phase-shifting algorithm for three-dimensional profilometry // Applied Optics, 2012. – Vol. 51, №. 1. – P. 33–42.
6. Sansoni, G.; Redaelli, E. A 3D vision system based on one-shot projection and phase demodulation for fast profilometry // Meas. Sci. Technol. – 2005, 16. – P. 1109–1118.
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. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-46-51>.
8. I. K. Kabardin, S. V. Dvoynishnikov, M. R. Gordienko, S. V. Kakaulin, V. E. Ledovskii, V. O. Zuev, Development of multivariable triangulation method for diagnostics of icing of wind turbine blades// Journal of Engineering Thermophysics. – 2022. – Vol. 31, №. 4. – P. 1–6.
9. Chen S.Y., Li Y.F. Self-recalibration of a colour-encoded light system for automated threedimensional measurements // Meas. Sci. Technol., 2003, Vol 14. - P. 33–40.

10. Zomet A., Wolf L., Shashua A. Omni-rig: linear self-recalibration of a rig with varying internal and external parameters // Proc. 8th IEEE Int. Conf. on Computer Vision, 2001, Vol 1. – P. 135–141.
11. Goldberg, K.A., Bokor J. Fourier-transform method of phase-shift determination // Applied Optics, 2001, Vol. 40, № 17. – P. 2886–2894.
12. Dvoynishnikov, S.V., Meledin, V.G., Pavlov, V.A. High-speed processing of phase images with parallel computations // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing 53(2). – 2017. – P. 145–150.
13. Dvoynishnikov S. V., Meledin V. G., Glavnyi V. G., Naumov I. V., Chubov A. S. Estimation of Optimal Frequency of Spatial Modulation of the Radiation of 3D Measurements // Measurement Techniques, 58(5). – 2015. – P. 506–511.
14. S.V. Dvoynishnikov, V.V. Rakhmanov, I.K. Kabardin, V.G. Meledin, Phase triangulation method with spatial modulation frequency optimization // Measurement, Vol.145 (2019). – P. 63–70. DOI:10.1016/j.measurement.2019.05.054.

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