

С. В. Двойнишников^{1}, В. Г. Меледин¹, В. О. Зуев¹, В. Г. Главный¹*

Оценка погрешности метода многокурсовой фазовой триангуляции и структурированного освещения для измерения трехмерной геометрии протяженных объектов

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

Аннотация. Работа посвящена оценке погрешности метода многокурсовой фазовой триангуляции для измерения трехмерной геометрии выпуклых и протяженных объектов. Выполнены теоретические оценки погрешности измерения и представлены результаты математического моделирования. Метод многокурсовой фазовой триангуляции для измерения трехмерной геометрии выпуклых и протяженных объектов обеспечивает необходимый уровень точности измерений и может использоваться для получения трехмерной геометрии сложнопрофильных выпуклых и протяженных объектов в условиях промышленности.

Ключевые слова: фазовая триангуляция, трехмерная геометрия, многокурсовые измерения

S. V. Dvoynishnikov^{1}, V. G. Meledin¹, V. O. Zuev¹, V. G. Glavny¹*

Estimation of the Error of the Method of Multiview Phase Triangulation and Structured Illumination for Measuring the Three-Dimensional Geometry of Extended Objects

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

Abstract. The work is devoted to the estimation of the error of the method of multi-angle phase triangulation for measuring the three-dimensional geometry of convex and extended objects. Theoretical estimates of the measurement error are made and the results of mathematical modeling are presented. The method of multi-view phase triangulation for measuring the three-dimensional geometry of convex and extended objects provides the required level of measurement accuracy and can be used to obtain three-dimensional geometry of complex-profile convex and extended objects in industrial conditions.

Keywords: phase triangulation, three-dimensional geometry, multiview measurements

Введение

Совершенствование методов трехмерной диагностики сложнопрофильных объектов актуально для энергетических технологий из-за повышающихся требований к геометрической точности элементов энергетических систем [1–3].

При измерениях трехмерной геометрии сложнопрофильных выпуклых и протяженных объектов методами фазовой триангуляции [4–5] обеспечить измерение всей поверхности объекта затруднительно. Для решения данной проблемы применяют многокурсовые методы измерения трехмерной геометрии.

В основном, все известные решения можно свести к методам, предусматривающим использование специальных маркеров для привязки различных измеренных фрагментов в итоговой трехмерной модели [6]; методам, предусматривающим вращение измеряемого объекта на заранее известный угол [7]; методам, предусматривающим вращение элементов оптической системы [8]; методам, использующим пространственные кросс-корреляционные алгоритмы для определения параметров совмещения фрагментов измеренной поверхности [9].

Методы с использованием маркеров обладают довольно низкой точностью совмещения измеренных фрагментов, ограниченной количеством используемых маркеров и качеством их изготовления. Кроме того, у экспериментаторов нет возможности использовать очень большое количество маркеров, так как с ростом их количества на измеряемой поверхности снижается качество измеренной трехмерной модели. Тем не менее, достоинством данного метода является инвариантность к форме и текстуре поверхности измеряемого объекта.

Развитием метода с использованием маркеров является метод многоракурсных измерений с использованием световых маркеров [10]. Суть метода сводится к совмещению измеренных фрагментов поверхности измеренного объекта по маркерам, которые не нанесены непосредственно на поверхность объекта, а подсвечивают локальные области поверхности, которые должны быть однозначно различимы с обоих ракурсов измерения. Такой подход является более универсальным, чем использование классических маркеров, однако требует дополнительного распознавания координат подсвеченных маркеров на поверхности объекта.

В рамках данной работы был применен многоракурсный метод фазовой триангуляции, позволяющий выполнять сшивку измеренных областей, опираясь на информацию о локальных параметрах засветки на поверхности измеряемого объекта. Суть метода заключается в следующем. Используется два фотоприемника, положение которых друг относительно друга зафиксировано, и один источник структурированной засветки. Измерение трехмерной геометрии выполняется последовательно, при этом на каждом шаге измеряется фрагмент поверхности. Измерение выполняется на основе принципа стереопары с помощью двух фотоприемников, причем в качестве анализируемой текстуры используется структурированная засветка, генерируемая источником оптического излучения. В результате обеспечивается максимально высокое разрешение текстуры, и минимизируется погрешность измерения.

Совмещение измеренных фрагментов выполняется аналогично методу опорных маркеров на измеряемой поверхности [10]. Отличие заключается в том, что маркерами выступают параметры структурированной засветки, наблюдаемые фотоприемниками в каждой точке на измеряемой поверхности. Такой подход обеспечивает минимизацию ошибки совмещения при измерении трехмерной геометрии протяженных и выпуклых объектов.

Цель данной работы заключается в оценке погрешности метода многоракурсной фазовой триангуляции при реализации процедуры сшивки фрагментов, измеренных с различных ракурсов.

Описание метода

При совмещении фрагментов поверхности оценку погрешности можно выполнять на основе оценки максимального отклонения положения точки после совмещения измеренных фрагментов, либо по отклонению пространственного положения геометрического центра облака измеренных фрагментов.

Теоретическая оценка погрешности выполнена на основе предположения, что отклонения измеренных фрагментов имеют нормальное распределение.

Пусть $Cl1$ и $Cl2$ – два облака точек, определяющих измеренный с различных ракурсов фрагмент. Взаимосвязь измеренных точек будет иметь следующий вид:

$$P_i^{Cl2} = (P_i^{Cl1} + E_i) \cdot M, \quad (1)$$

где P_i^{Cl1} – вектор, определяющий i -ю измеренную точку облака $Cl1$, P_i^{Cl2} – вектор, определяющий i -ю измеренную точку облака $Cl2$, E_i – отклонение результата измерения i -й точки облака $Cl1$ относительно i -й точки облака $Cl2$, M – матрица преобразования системы координат облака $Cl1$ в систему координат облака $Cl2$.

В результате работы алгоритма сшивки измеренных фрагментов поверхности, будет вычислена матрица M' преобразования системы координат облака $Cl1$ в систему координат облака $Cl2$. То есть координаты i -й точки после преобразования координат облака $Cl1$ в системе координат облака $Cl2$:

$$P_i^{Cl2'} = P_i^{Cl1} \cdot M' \quad (2)$$

Погрешность совмещения облаков может быть выражена случайной величиной по аналогии с E_i :

$$E_i' = \begin{bmatrix} X(P_i^{Cl2}) - X(P_i^{Cl2'}) \\ Y(P_i^{Cl2}) - Y(P_i^{Cl2'}) \\ Z(P_i^{Cl2}) - Z(P_i^{Cl2'}) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где X, Y, Z – соответствующие декартовы координаты точки в системе отчета. Ошибка совмещения облаков может быть оценена, как максимальное отклонение координат точки $P_i^{Cl2'}$ от координат P_i^{Cl2} :

$$\text{Err}_{\max} = \max \left(\left\{ E_i' \right\}_{i=1..N} \right), \quad (4)$$

где N – количество точек в облаках $Cl1$ и $Cl2$. Учитывая, что изначально облако точек $Cl2$ строилось добавлением случайного вектора E_i , то при корректной ра-

боте алгоритма сшивки измеренных фрагментов поверхности можно считать верным условие:

$$\text{Err}_{\max} \leq \max\left(\{E'_i\}_{i=1..N}\right), \quad (5)$$

Если случайная величина E_i имеет нормальное распределение, то случайная величина, определяющая отклонение координат точек в различных облаках после сшивки, будет иметь нормальное распределение с подобными параметрами.

Результаты математического моделирования

Для проверки работоспособности выполнено математическое моделирование работы алгоритма сшивки облаков. Сгенерировано плоское облако $C1$ случайных распределенных на одной плоскости точек в ограниченном объеме. Второе облако $C2$ сгенерировано, как облако $C1$ с добавкой случайной величины к каждой координате каждой точки множества, смещенное на случайную векторную величину и повернутое на два случайных угла относительно осей X и Z . Пространственные преобразования могут быть описаны линейной матрицей $M0$:

$$C2 = (C1 + E) \cdot M0. \quad (6)$$

После этого применяем алгоритм сшивки фрагментов поверхностей, описанный в [5], и получаем преобразованное облако точек $C3$, полученное с помощью вычисленной матрицы преобразования $M1$:

$$C3 = C2 \cdot M1. \quad (7)$$

Оцениваем максимальное отклонение геометрического центра облака $C3$ относительно $C1$.

На рис. 1 представлены облака $C1$ и $C2$ в системе координат облака $C1$.

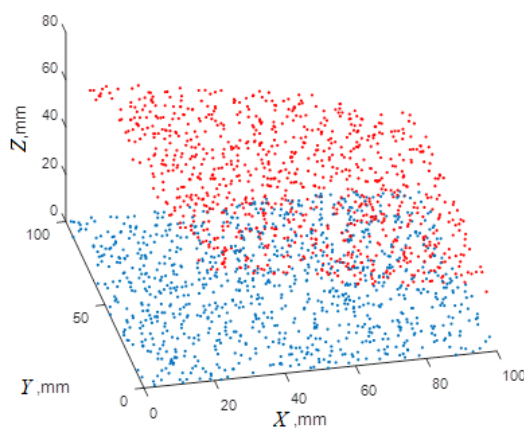
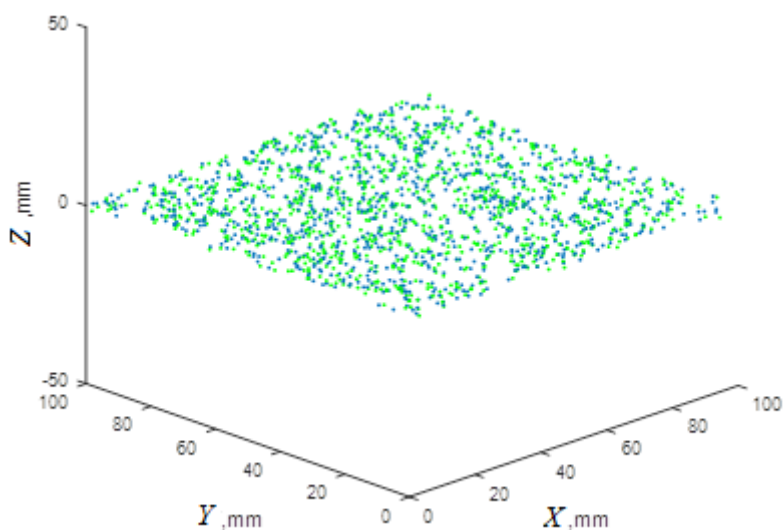


Рис.1. Распределение облаков $C1$ (синие точки) и $C2$ (красные точки) в системе координат облака $C1$

В результате работы алгоритма сшивки получено распределение облаков $C3$ (рис.2). Значение $E_{rr_{max}}$ равно 3,63 мм при среднеквадратичном отклонении (СКО) множества E , равном 1 мм.



Р и с .2. Распределение облаков $C1$ (синие точки) и $C3$ (зеленые точки) в системе координат облака $C1$ после сшивки облаков $C1$ и $C2$

Ниже представлена динамика величины $E_{rr_{max}}$ от номера эксперимента при тех же параметрах: СКО множества E 1 мм, количество точек в облаке 1000, размер плоского участка, на котором расположены измеренные точки, 100x100 мм.

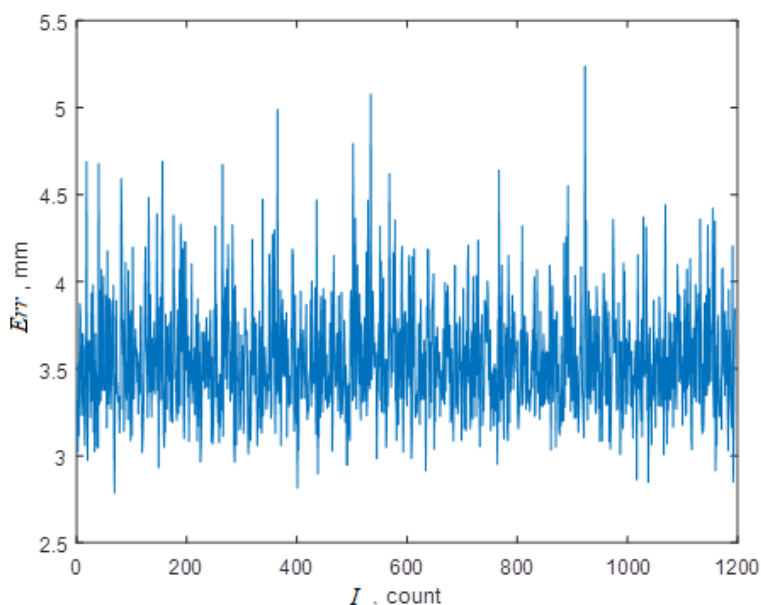
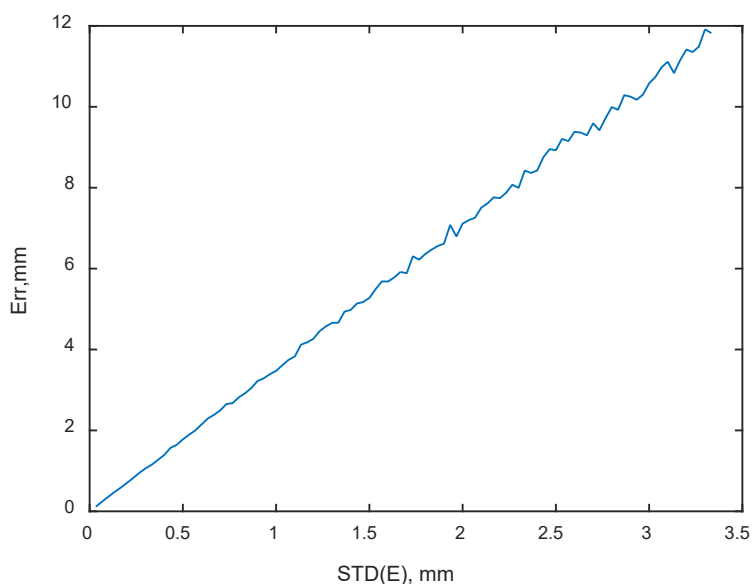


Рис.3. Динамика величины $E_{rr_{max}}$ от номера эксперимента при СКО(E)=1 мм

Среднее значение $E_{rr,max}$ составило 3,54 мм.

На рис. 4 показана зависимость среднего значения $E_{rr,max}$ от величины СКО(E).



Р и с .4. Зависимость $E_{rr,max}$ от величины СКО(E)

В результате получено, что зависимость $E_{rr,max}$ от СКО(E) близка к линейной.

Заключение

В рамках работы выполнены теоретические оценки погрешности измерения, и представлены результаты математического моделирования. Показано, что представленный метод многоракурсной фазовой триангуляции для измерения трехмерной геометрии выпуклых и протяженных объектов обеспечивает необходимый уровень точности измерений и может использоваться для получения трехмерной геометрии сложнопрофильных выпуклых и протяженных объектов в условиях промышленности.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. S.V.Dvoynishnikov, V.G.Meledin Optoelectronic Differential Cloudy Triangulation Method for Measuring Geometry of Hot Moving Objects / Optoelectronics in Machine Vision-Based Theories and Applications, M.Rivas-Lopez, O.Sergiyenko, W.Flores-Fuentes, J. C. Rodríguez-Quiñonez, August 2018, p. 49–78.
2. Meledin V. Optoelectronic Measurements in Science and Innovative Industrial Technologies // Optoelectronic Devices and Properties. – Chapter 18. – Suffolk, UK: INTECH, 2011. – Pp. 373–399.

3. Kulikov D.V., Anukin Yu.A., Dvoynishnikov S.V., Meledin V.G. Laser technology for determining the geometry of a hydroelectric generator rotor under load // *Power Technology and Engineering* 44(5), 2010. – Pp. 416–420.
4. D’Apuzzo N Overview of 3D surface digitization technologies in Europe, in: *Proc. SPIE*, 2006, p. 1–13
5. S.S. Gorthi, P. Rastogi, Fringe projection techniques: whither we are? *Opt. Lasers Eng.*, 48 (2010). – Pp. 133–140.
6. Johannes S, Weninger W, Müller G External marker-based automatic congruencing: a new method of 3D reconstruction from serial sections / *The Anatomical Record*. – 1997 – Vol. 248. – Pp. 583–602.
7. M. Halioua, R. S. Krishnamurthy, H. C. Liu, and F. P. Chiang, “Automated 360° profilometry of 3-D diffuse objects”, *Appl. Opt.*, 24(14), 2193–2196 (1985).
8. M.Servin, M.Padilla, G.Garnica 360-degrees profilometry using strip-light projection coupled to Fourier phasedemodulation // *Opt Express*. – 2016 Jan 11. – 24(1) – Pp. 168–179.
9. Chauve, P. Labatut, and J. Pons. Robust piecewise-planar 3d reconstruction and completion from large-scale unstructured point data. In *CVPR*, 2010.
10. RU Patent № 2708940, priority 15.01.2019.

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