

В. О. Зуев¹✉, С. В. Двойнишников¹, Г. В. Бакакин¹, В. А. Павлов¹

Адаптивный к оптическим свойствам поверхности триангуляционный контроль трехмерных деформаций

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vlad.zuev.0017@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена решению проблемы дистанционного контроля поля трехмерных деформаций в условиях динамического изменения оптических свойств диагностируемой поверхности. Предложен комплекс методов триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций, обеспечивающий возможность адаптации к оптическим свойствам диагностируемой поверхности. Для триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций поверхности с наличием характерных, отличительных особенностей предложен метод на основе анализа ее текстуры, детектирования двумерных векторов перемещений на изображении фотоприемника и их преобразования в трехмерное пространство. Для триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций поверхности, текстура которой не содержит характерных, отличительных особенностей, предложен метод на основе анализа изменения ее пространственного положения. Результаты восстановления поля трехмерных деформаций сложнопрофильной металлической пластины предложенными методами подтверждают их работоспособность и возможность достижения погрешности на уровне 10^{-5} м. Результаты, полученные в рамках данной работы, открывают возможность дистанционного контроля трехмерных деформаций поверхностей с оптическими свойствами в широком диапазоне.

Ключевые слова: поле трехмерных деформаций, адаптивный триангуляционный контроль

V. O. Zuev¹✉, S. V. Dvoynishnikov¹, G. V. Bakakin¹, V. A. Pavlov¹

Adaptive to surface optical properties three-dimensional deformations triangulation control

¹Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vlad.zuev.0017@mail.ru

Abstract. The work is devoted to the problem of three-dimensional deformation field remote control under conditions of dynamic changes in the diagnosed surface optical properties. To adapt to the diagnosed surface optical properties a set of three-dimensional deformation field triangulation control methods is proposed. For triangulation control of three-dimensional deformations field of the surface with characteristic, distinctive features, a method, based on texture analysis, two-dimensional displacement vectors in photodetector image detection and their transformation into three-dimensional space, is proposed. For triangulation control of three-dimensional deformations field of the surface without characteristic, distinctive features in its texture, a spatial position changes analysis method is proposed. The results of the three-dimensional deformation field reconstruction of a complex metal plate using the proposed methods confirm their operability and the possibility of achieving an accuracy of 10^{-5} m. The work results open up the possibility of three-dimensional deformations remote control of surfaces with optical properties in a wide range.

Keywords: three-dimensional deformations field, adaptive triangulation control

Введение

Прецизионный контроль геометрии объектов в машиностроении и энергетике требует разработки оптико-электронных измерительных систем с возможностями учета оптических свойств поверхности и компенсации нелинейных искажений измерительного тракта. Такие измерительные системы необходимы для дистанционного контроля трехмерных деформаций исследуемого объекта, изолированного в рабочем участке экспериментального стенда с оптическим доступом.

Среди оптико-электронных методов измерения трехмерной геометрии возможность проведения калибровки, исключающей необходимость расчета коэффициентов преломления сред, компенсирующей искажения трассы оптических лучей и дисторсии оптических элементов, обеспечивают триангуляционные методы на основе структурированного освещения [1]. Их развитие наиболее перспективно для разработки адаптивных к оптическим свойствам поверхности и нелинейным искажениям измерительных систем.

Одним из наиболее информативных инструментов контроля изменения геометрии объекта является измерение поля трехмерных деформаций [2-4]. Для контроля поля деформаций на основе результатов триангуляционных измерений зачастую детектируют смещения участков на изображениях фотоприемника и восстанавливают трехмерные векторы деформации с помощью калибровочных преобразований матричных координат в пространственные. К текстуре измеряемой поверхности объекта предъявляют требование наличия характерных, отличительных особенностей [5]. В случае их отсутствия на поверхность наносят специальные шаблоны или покрытия [2, 6, 7]. Подготовка контролируемой поверхности, выбор метода диагностики и установка параметров измерительной системы происходят перед началом испытаний. В результате отсутствия адаптивных методов регистрации структурированных изображений, их обработки и восстановления поля деформаций приводит к росту погрешности контроля геометрии объекта в условиях динамического изменения оптических свойств его поверхности.

Данная работа посвящена разработке комплекса методов триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций, обеспечивающего возможность адаптации к оптическим свойствам диагностируемой поверхности.

Метод триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций на основе анализа текстуры поверхности

Для триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций поверхности с наличием характерных, отличительных особенностей предложен метод на основе анализа ее текстуры. Реализуется детектирование двумерных векторов перемещений на изображении фотоприемника и их последующее преобразование в трехмерное пространство.

Детектирование двумерных векторов перемещений участков поверхности на изображении фотоприемника реализуется на основе пространственно-временного корреляционного анализа. Анализируется область изображения объекта до дефор-

мации размером $(W \times H)$ с координатами центра (x_0, y_0) и распределением яркости $I_0(x, y)$. На изображении объекта после деформации рассматриваются области размером $(W \times H)$ с распределением яркости $I_d(x, y)$ и координатами центра (x_i, y_i) , лежащими в интервалах по X : $[x_0 - \text{MaxShift}_X; x_0 + \text{MaxShift}_X]$ и по Y : $[y_0 - \text{MaxShift}_Y; y_0 + \text{MaxShift}_Y]$, где MaxShift_X и MaxShift_Y – установленные оператором значения максимальных сдвигов участков поверхности на изображении фотоприемника. Для каждой рассматриваемой области рассчитывается и сохраняется значение коэффициента корреляции Пирсона:

$$r(I_0, I_d) = \frac{c(I_0, I_d)}{\sqrt{s_{I_0}^2 s_{I_d}^2}}, \quad (1)$$

$$c(I_0, I_d) = \sum_{\Delta x} \sum_{\Delta y} (I_0(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y) - \bar{I}_0) (I_d(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y) - \bar{I}_d), \quad (2)$$

$$s_{I_0}^2 = \sum_{\Delta x} \sum_{\Delta y} (I_0(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y) - \bar{I}_0)^2, \quad (3)$$

$$s_{I_d}^2 = \sum_{\Delta x} \sum_{\Delta y} (I_d(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y) - \bar{I}_d)^2, \quad (4)$$

где $\Delta x \in \left[-\frac{W}{2}; \frac{W}{2}\right]$, $\Delta y \in \left[-\frac{H}{2}; \frac{H}{2}\right]$, $\bar{I}_0$ и $\bar{I}_d$ – средние значения яркости в областях на изображениях объекта до и после деформации, соответственно. В интервалах по X : $[x_0 - \text{MaxShift}_X; x_0 + \text{MaxShift}_X]$ и по Y : $[y_0 - \text{MaxShift}_Y; y_0 + \text{MaxShift}_Y]$ находятся координаты (x_d, y_d) точки с максимальным значением коэффициента корреляции Пирсона r , которые принимаются в качестве оценки координаты анализируемого участка поверхности на изображении после деформации.

Для контроля достоверности найденных координат (x_d, y_d) предложен метод пороговой фильтрации. Вектор смещения участка поверхности на изображении фотоприемника $(x_0, y_0) \rightarrow (x_d, y_d)$ считается найденным, если коэффициент выраженности максимума корреляции $R > R_{\text{thresh}}$:

$$R = \frac{\sum_x \sum_y (r_{xy} - r_{min})}{(2 \cdot MaxShift_X + 1)(2 \cdot MaxShift_Y + 1)(r_{max} - r_{min})}, \quad (5)$$

где R_{thresh} – установленное оператором пороговое значение в диапазоне $[0; 1]$, (x, y) – координаты на изображении фотоприемника, $x \in [x_0 - MaxShift_X; x_0 + MaxShift_X]$, $y \in [y_0 - MaxShift_Y; y_0 + MaxShift_Y]$, $r_{xy} = r(I_0, I_d)$, где центр области I_d соответствует координатам (x, y) , r_{min} и r_{max} – минимальное и максимальное значения коэффициента корреляции Пирсона в анализируемых границах по x и y .

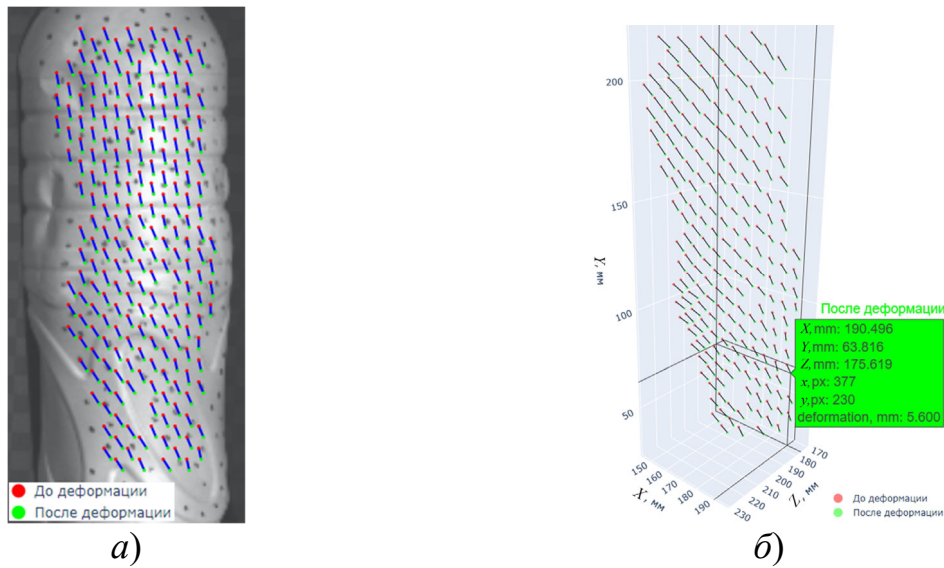


Рис. 1. Демонстрация работы метода триангуляционного контроля трехмерных деформаций б) на основе анализа текстуры поверхности а)

Восстановление трехмерных векторов деформации (рис. 1, б) реализовано на основе найденных смещений участков поверхности на изображении фотоприемника (рис. 1, а) $(x_0, y_0) \rightarrow (x_d, y_d)$ и информации о трехмерных координатах объекта до (X_0, Y_0, Z_0) и после (X_d, Y_d, Z_d) деформации в соответствующих матричных элементах, полученной в ходе триангуляционных измерений трехмерной геометрии.

Метод триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций на основе анализа изменения пространственного положения поверхности

Для триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций поверхностей, текстура которых не содержит характерных, отличительных особенностей, а нанесение маркеров нежелательно или невозможно, предложен метод расчета

локальной деформации на основе восстановления полигональной поверхности и анализа изменения ее положения.

Работа предложенного метода расчета локальной деформации включает следующие итерации:

- 1) восстановление полигональных поверхностей объекта до и после деформации;
- 2) адаптивная фильтрация полигонов;
- 3) построение карты нормалей;
- 4) расчет локальных деформаций на основе расстояния от анализируемого полигона исходной поверхности до ближайшего по направлению нормали полигона деформированной поверхности (рис. 2).

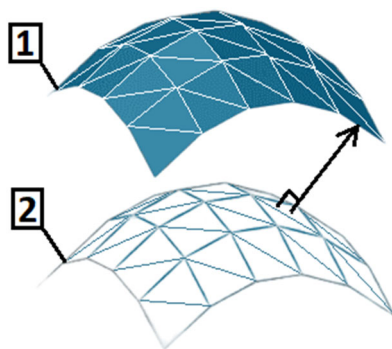


Рис. 2. Демонстрация работы метода триангуляционного контроля трехмерных деформаций на основе анализа изменения пространственного положения поверхности

Для восстановления полигональной поверхности объекта разработан метод сшивки в полигоны трехмерных точек объекта, полученных в ходе триангуляционного измерения трехмерной геометрии. Используя структурированность трехмерных точек (X, Y, Z) по изображению фотоприемника (x_c, y_c) , для каждой координаты (x_c, y_c) восстанавливаются 2 полигона:

$$Polygon_1 = \{v_1, v_2, v_3\}, \quad (6)$$

$$Polygon_2 = \{v_1, v_3, v_4\}, \quad (7)$$

где v_1, v_2, v_3, v_4 – трехмерные координаты точек в элементах матрицы фотоприемника с координатами (x_c, y_c) , (x_{c+1}, y_c) , (x_{c+1}, y_{c+1}) , (x_c, y_{c+1}) , соответственно.

В ходе итерирования по полигонам исходной поверхности на каждом шаге рассчитывается значение локальной деформации, соответствующее расстоянию до ближайшего по направлению нормали полигона деформированной поверхно-

сти. Полученное значение деформации сохраняется в координатах матрицы фотоприемника, соответствующих координатам вершин полигона на изображении. В результате восстанавливается двумерное поле деформации по изображению фотоприемника (рис. 3, б).

Достоинством разработанного метода контроля поля трехмерных деформаций является отсутствие ограничений, связанных с текстурой диагностируемой поверхности. Недостатком предложенного метода является его ограниченная применимость в задачах контроля продольных трехмерных деформаций.

Экспериментальные результаты

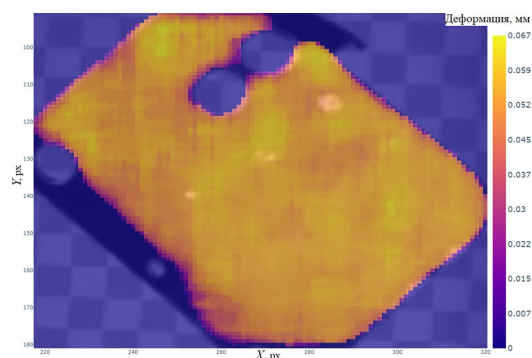
Для анализа работоспособности и погрешностей предложенных методов триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций выполнено экспериментальное тестирование и обработка полученных данных.

Измерительная система включала цифровой проектор TouYinGer Q10 FullHD 1080p и фотоприемник Imaging Source DMM 25GP031-ML с объективом Imaging Source TCL 5026 5MP и программно установленным разрешением 518×388 . В качестве экспериментального объекта выбрана сложнопрофильная металлическая пластина, жестко закрепленная в зажим механизма линейного перемещения с шагом 10 мкм (рис. 3, а).

Выполнены измерение трехмерной геометрии контролируемой пластины методом фазовой триангуляции [8], линейное перемещение объекта на 50 мкм для моделирования деформации и повторное измерение. В результате обработки трехмерной геометрии контролируемого объекта до и после деформации восстановлены поля трехмерных деформаций (рис. 3, б) разработанными методами. В методе триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций на основе анализа текстуры поверхности размеры W и H установлены в 21 пиксель, а пороговое значение $R_{thresh} = 0,5$. Среднее значение и среднеквадратичное отклонение деформации в восстановленных полях составили 54 мкм и 11 мкм, соответственно.



а)



б)

Рис. 3. Восстановленное поле трехмерных деформаций б) сложнопрофильной металлической пластины а)

Заключение

В работе предложен комплекс методов триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций, обеспечивающий возможность адаптации к оптическим свойствам диагностируемой поверхности. Разработаны методы триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций в условиях наличия и отсутствия характерных, отличительных особенностей в текстуре контролируемой поверхности. Разработан метод триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций на основе анализа текстуры поверхности, детектирования двумерных векторов перемещений на изображении фотоприемника и их последующего преобразования в трехмерное пространство. Разработан метод триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций без анализа текстуры поверхности на основе детектирования изменения ее пространственного положения. Экспериментальные результаты подтверждают возможность контроля трехмерных деформаций предложенными методами с погрешностью на уровне 10^{-5} м. Результаты, полученные в рамках данной работы, открывают возможность дистанционного контроля трехмерных деформаций исследуемых поверхностей с оптическими свойствами в широком диапазоне.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Narasimhan S.G., Nayar S.K. Structured light methods for underwater imaging: light stripe scanning and photometric stereo //Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE. – IEEE, 2005. – С. 2610–2617.
2. Южина Т.Н. Высокоскоростное деформирование и разрушение некоторых пород древесины: дисс. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Южина Т.Н. – ННГУ., Нижний Новгород., 2022. – 163 с.
3. Investigating the Strain and Degradation Parameters of Rapidly Discharging Lithium-ion Batteries using 3D Digital Image Correlation: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.correlatedsolutions.com/application/cid-battery-test-usc>. (Дата обращения: 13.05.2025).
4. Printed Circuit Board (PCB) Measurement from Thermal Loading: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.correlatedsolutions.com/application/circuit-board>. (Дата обращения: 13.05.2025).
5. Видеоэкстензометр: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zwickroell.com/ru/ak-sessuary/ehkstenzometry/videoxtens/>. (Дата обращения: 13.05.2025).
6. Федоров А.Е., Самарцев В.А., Гаврилов В.А., Вильдеман В.Э., Словиков С.В. Экспериментальное исследование механических свойств современных хирургических рассасывающихся шовных материалов //Российский журнал биомеханики. – 2009. – №. 4. – С. 78–84.
7. Лобанов Д.С., Бабушкин А.В. Экспериментальные исследования влияния повышенных и высоких температур на прочностные и деформационные свойства комбинированных стеклоорганопластиков //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – №. 1. – С. 104–117.
8. Зуев В.О., Двойнишников С.В., Кабардин И.К., Меледин В.Г. Система измерения трёхмерной геометрии методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея: программный комплекс для настройки // Измерительная техника. – 2022. – № 8. – С. 46–51.

© В. О. Зуев, С. В. Двойнишников, Г. В. Бакакин, В. А. Павлов, 2025