

**18 - Приборы и методы экспериментальной физики.
Информационные технологии в физических исследованиях**

Двойнишников Сергей Владимирович, зав. лаб.

Новосибирск, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Методы оптико-электронной диагностики геометрических параметров для промышленных технологий

e-mail: dv.s@mail.ru

стр. 160

Зуев Владислав Олегович, 1 курс

Новосибирск, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, физический

Программно-аппаратный комплекс для измерения трехмерной геометрии наледи триангуляционными методами с использованием структурированного освещения

Двойнишников Сергей Владимирович, д.т.н.

e-mail: vlad.zuev.0017@mail.ru

стр. 161

Оптико-электронная диагностика геометрических параметров для промышленных технологий

Двойнишников Сергей Владимирович
Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН
dv.s@mail.ru

Задача высокоточных измерений геометрических параметров в технологических процессах является важной для широкого спектра промышленных применений. Контроль геометрии сложнопрофильных изделий важен для нефтегазового и аэрокосмического комплексов, энергетики и атомной промышленности, всюду, где необходим размерный контроль точных машиностроительных изделий со сложной геометрией [1-4].

Существующие решения, направленные на измерение геометрических параметров оптическими методами можно разбить на несколько больших групп: интерференционные, времяпролетные, фазовые, триангуляционные, методы частотной модуляции и методы анализа визуальных образов. В представляемом докладе внимание уделено различным научно-техническим решениям, которые находят применение в задачах измерения геометрических параметров в различных технологических процессах в промышленности и науке.

Методы оптической триангуляции основаны на определении расстояния по положению пятна рассеянного на поверхности пучка излучения на фотоприемнике. Метод оптической триангуляции работает следующим образом. Излучательный канал формирует изображение светового пятна на контролируемой поверхности. Рассеянный контролируемой поверхностью свет попадает в приемный канал. В плоскости фотоприемника строится изображение освещенного участка контролируемой поверхности в форме светового пятна. При смещении контролируемой поверхности на величину ΔZ (рис. 1), световое пятно в плоскости фотоприемника смещается на величину δz . Зависимость смещения контролируемой поверхности ΔZ от смещения светового пятна в плоскости фотоприемника δz имеет следующий вид:

$$\Delta Z = r \cdot \frac{\sin \varphi}{\sin(\alpha - \varphi)}, \quad (1)$$

$$\varphi = \text{atan}\left(A \cdot \frac{\delta z}{1 + B \cdot \delta z}\right) \quad (2)$$

$$A = \sin \beta / r' \quad (3)$$

$$B = -\cos \beta / r' \quad (4)$$

где r и r' - расстояния от контролируемой поверхности до проецирующего объектива приемного канала и от проецирующего объектива до фотоприемника. Существует большое количество модификаций метода оптической триангуляции, нацеленных на улучшение метрологических характеристик в специфических условиях.

Триангуляционные методы светового сечения заключаются в формировании на поверхности объекта узкой световой полосы и наблюдении ее формы с направления, отличного от направления освещения. Наблюдаемые искажения полосы определяют геометрию поверхности в плоскости светового сечения.

Известны методы бесконтактного измерения полного трехмерного профиля поверхности, реализующие принцип сканирующей подсветки, который используется в трехмерной компьютерной анимации и некоторых других приложениях для регистрации формы поверхности. Метод основан на том, что последовательно сканируют отдельные контуры поверхности светящейся полосой и судят о контролируемых размерах по степени искажения изображения полосы и ее местоположению в декартовой системе координат. Основным недостатком данного метода заключается в высокой погрешности и длительном времени контроля, связанном с наличием операции последовательного сканирования.

Наиболее часто используемой модификацией метода триангуляции является триангуляция с использованием пространственной модуляции оптического источника. Данный метод предполагает, что на поверхность контролируемого объекта проецируют не световой пучок, а пространственно модулированную засветку (одномерную или двухмерную). На фотоприемнике анализируют наблюдаемое двухмерное распределение рассеянного излучения, которое, в случае формирования засветки в виде полутоновых полос с гармоническим изменением интенсивности, может быть описано следующим выражением:

$$I(x, y) = A(x, y)(1 + V(x, y) \cos(\varphi(x, y))) \quad (5)$$

где $I(x, y)$ – распределение интенсивности на изображении контролируемого объекта; $A(x, y)$ – распределение фоновой интенсивности; $V(x, y)$ – средняя видность; $\varphi(x, y)$ – распределение разности фаз, кодирующее информацию о дальности объекта;

В докладе представлены различные современные методы оптико-электронной диагностики, позволяющие выполнять измерения геометрических параметров, а также выполнять трехмерное сканирование поверхности измеряемого объекта в промышленных условиях. Будут рассмотрены методы, адаптированные для работы в тяжелых эксплуатационных условиях действующей промышленности.

Список публикаций:

[1] Dvoynishnikov S.V., Meledin V.G. *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] 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. DOI: 10.1007/978-3-030-22587-2_21.

[3] D V Kulikov, A S Chubov, O Yu Sadbakov, S V Krotov, N N Ovchinnikov *Method of measuring the geometry of rotating parts of power stations based on the effect of self-mixing of laser radiation // 2019 Journal of Physics: Conference Series Vol. 1359, 012098.*

[4] 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.*

Программно-аппаратный комплекс для измерения трехмерной геометрии наледи триангуляционными методами с использованием структурированного освещения

Зуев Владислав Олегович

Новосибирский государственный университет

Двойнишиников Сергей Владимирович, д.т.н.

vlad.zuev.0017@mail.ru

Среди задач измерения трехмерной геометрии объекта особое место занимает задача измерения трехмерной геометрии наледи. Актуальность данной задачи обусловлена наличием широкого спектра научно-технических задач, направленных на борьбу с обледенением. Примером может служить задача поиска оптимального метода борьбы с обледенением на ветрогенераторах, при решении которой появляется необходимость системы диагностики и анализа трехмерной геометрии наледи. Требования высокой точности измерения, учета отражающих свойств наледи, отсутствия контакта с измерительным объектом существенно ограничивают выбор метода измерения. Среди оптических методов измерения трехмерной геометрии наиболее перспективны триангуляционные с использованием структурированного освещения ввиду их высокой точности, широкого применения и существенного уровня развития.

Целью данной работы является разработка программно-аппаратного комплекса для измерения и анализа трехмерной геометрии наледи триангуляционными методами с использованием структурированного освещения. В рамках работы требуется разработать систему измерения трехмерной геометрии слоя льда, образующегося на объекте. Измерения выполняются в трубе прямоугольного сечения с характерными размерами 20x20 см с прозрачными стенками.

Метод измерения трехмерной геометрии реализован на основе комбинации триангуляционных методов с использованием структурированного освещения: фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея. Использование комбинации методов взаимноисключает их недостатки. Совокупность однозначности декодирования бинарных кодов Грея и непрерывности фазы повышает точность измерения. Работа данных методов реализована с помощью проектора и камеры, благодаря чему появилась возможность гибкой настройки конфигурации измерительной установки.

Для подбора оптимальных параметров измерительной оптической системы реализовано программное обеспечение для анализа работы методов фазовой регрессии, бинарных кодов Грея, комбинации методов и всей измерительной системы в целом. Дополнительно реализованное программное обеспечение выполняет оценку погрешности измерений. Данная функциональность применена для настройки оптимальных параметров измерительного комплекса. Для расчета и анализа геометрических параметров наледи разработано программное обеспечение на языке программирования Python в среде Jupyter. Программное обеспечение предоставляет следующую функциональность: расчет толщины ледяного нароста в каждой точке объекта, расчет статистических данных по толщине наледи, анализ наледи внутри среза по поверхности объекта. Полученные с помощью программного комплекса данные можно использовать для численной оценки массы ледяного нароста.

Создан измерительный комплекс для измерения трехмерной геометрии наледи на экспериментальном стенде для исследования процессов обледенения элементов ветроэнергетических установок. Измерительный комплекс состоял из фотоприемника Imaging Source DMK 33GX264 с объективом Imaging Source TCL 5026 5MP, цифрового проектора Excelvan CL720 с разрешением 1280x800 и светосилой 3000 лм с доработанной оптической системой для формирования резкого изображения на расстоянии 60-80 см. Измерительный объем составил 85 мм x 67 мм x 25 мм. Расстояние от источника освещения до измеряемого объекта 65 см, расстояния от фотоприемника до объекта 150 см. Угол между оптическими осями источника и приемника оптического излучения 70°. Достигнута погрешность измерений на уровне 9 мкм.

В результате создан программно-аппаратный комплекс для измерения трехмерной геометрии наледи, реализующий методы фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея. Разработаны конфигурации измерительной системы для диагностики наледи на различных участках объекта. Достигнута точность измерений 9 мкм. Проведены эксперименты по измерению трехмерной геометрии наледи характерной толщиной 0.75 мм и диагностике ее геометрических параметров. Получены результаты, демонстрирующие широкий спектр применимости триангуляционных методов с использованием структурированного освещения.