

К. ВАЙСЕНЗЕЕ, Г. А. ПОЛЬТЕ, Г. ЛИНС

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Представлен метод оценки погрешностей геометрических измерений с использованием цифровой обработки изображений, не требующий повторных измерений. Метод был апробирован при работе с промышленными объектами.

**Ключевые слова:** погрешности измерений, обработка изображений, функция распределения плотности вероятности, метод Монте-Карло.

**Введение.** Цифровое изображение объекта является основой всех измерений геометрических величин с использованием датчиков изображений. Для измерений геометрических размеров деталей в промышленности широко используются оптические системы обработки изображений. Такие системы характеризуются быстродействием, возможностью бесконтактного использования и быстрой перенастройки. Разработанный метод основывается на использовании информации о качестве изображения.

**Метод измерений с использованием цифровой обработки изображений.** Логическая последовательность действий [1] при измерениях длины с использованием систем обработки изображения на примере детали из кремния и хрома (падающий свет) продемонстрирована на рис. 1.

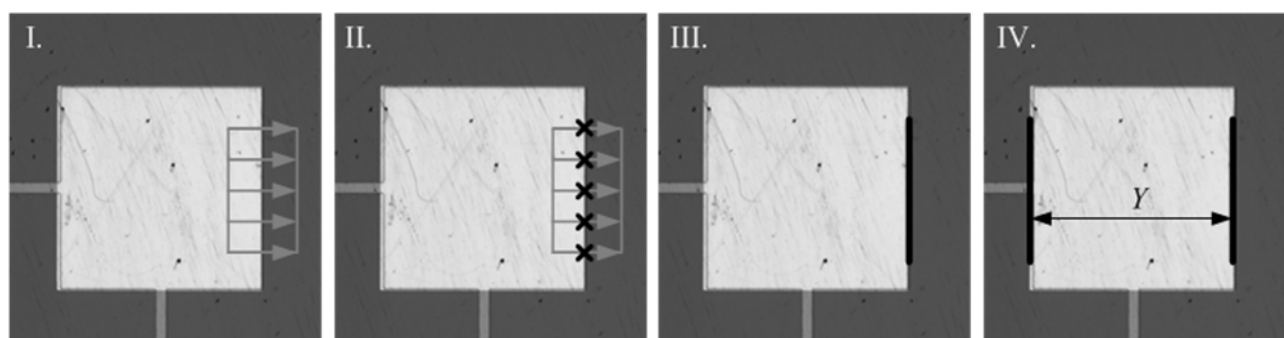


Рис. 1

I. Объект измерений с определенным числом линий поиска помещается в область обработки цифрового изображения.

II. В области изображения вдоль линий поиска определяется контур измеряемого объекта. Далее определяется точное положение границы объекта на переходе уровня яркости [2].

III. В выбранной системе координат на основе математических методов [3—5] рассчитываются геометрические параметры [6].

IV. Искомая величина, например расстояние между двумя прямыми линиями, рассчитывается с использованием геометрических методов.

Оптические камеры формируют двумерную область измерений [7], позволяя производить измерения между множеством точек без перемещения системы координат.

**Оценка погрешностей измерений.** Метод оценки погрешностей измерений с использованием стандарта GUM [1] на практике подходит не для всех случаев [8, 9]. В стандарте представлен метод расчета стандартной погрешности для модели, которая является линейной или может быть аппроксимирована с помощью ряда Тейлора первого порядка [10].

Альтернативой GUM [1] выступают методы, основанные на моделировании. В первом дополнении к стандарту GUM [11] представлен новый способ расчета на основе метода Монте-Карло, позволяющий использовать большое число различных распределений вероятностей для входных величин [12]. Алгоритм процесса виртуальных измерений является основой расчета погрешностей измерений [13]. Однако расчет производится не на базе экспериментальных данных, полученных при продолжительном производственном эксперименте, а с помощью многократно повторяющихся виртуальных экспериментов [14]. При этом используются псевдослучайные числа от нуля до единицы, чтобы генерировать возможные значения входных величин для различных функций распределения плотности вероятности. Последняя может быть согласована с моделью возмущения возможных значений входных величин, сгенерированной из уравнения Маркова [8].

Использование метода Монте-Карло помогает избежать комплексного анализа, который при сложной модели процесса измерений может быть трудоемким. Также одним из достоинств метода является достаточная простота реализации. Недостатком является большое количество вычислений во время моделирования [15].

Представленный в настоящей работе метод основан на анализе характеристики сигнала линии поиска. Для оценки характеристик положения границы определяются параметры изображения [16].

Возможным способом для вывода закономерностей соответствия является множественный регрессионный анализ. Такой анализ учитывает влияние множества величин на выходную величину.

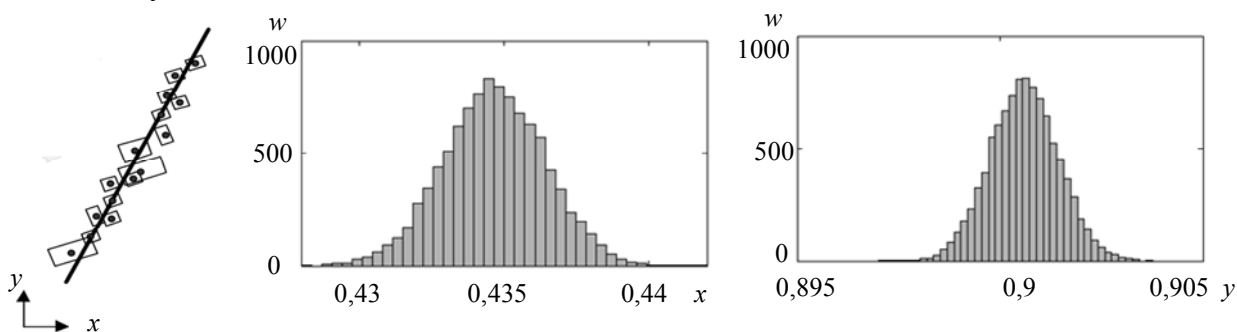


Рис. 2

**Оценка погрешностей измерений контролируемых величин.** Контролируемыми величинами являются геометрические размеры. Для расчета значения контролируемой величины необходимо определить множество различных точек. При этом погрешности измерений положений каждой точки определяются числом последовательных реализаций метода Монте-Карло. На рис. 2 приведен пример моделирования. Для параметров регрессионного уравнения представлены соответствующие функции плотности вероятности нормального распределения. Погрешности измерений  $x$ - и  $y$ -компонент измеряемых точек определяются экспериментально.

На рис. 3 приведен пример использования разработанного метода оценки погрешностей в микросистемной технике. Здесь в качестве подложки для микромеханических и электронных элементов используются прямоугольные и круглые пластины толщиной около 1 мм [17]. Измерения производились на основе критерия определения границы объекта „динамическое

пороговое значение“ с использованием падающего освещения (рис. 3, а). Радиус объекта  $R$  определялся путем расчета 20 точек, лежащих на окружности, с использованием метода Гаусса при решении соответствующей системы алгебраических уравнений. При экспериментальном определении погрешности измерений на основе  $n=10$  измерений погрешность  $\Delta$  составила 0,0461 пиксела (рис. 3, б). При использовании нового метода была рассчитана погрешность измерений 0,0482 пиксела (рис. 3, в). Для этого использовалась реализация Монте-Карло с  $w=10\,000$  повторными виртуальными экспериментами (рис. 3, в). Определялось рассеяние значений уровня яркости в соответствии с регрессионным моделированием. Отклонение между оценкой, полученной с использованием предложенного метода на основе знаний, и расчетом, сделанным на основе эксперимента, составляет 4,4 %.

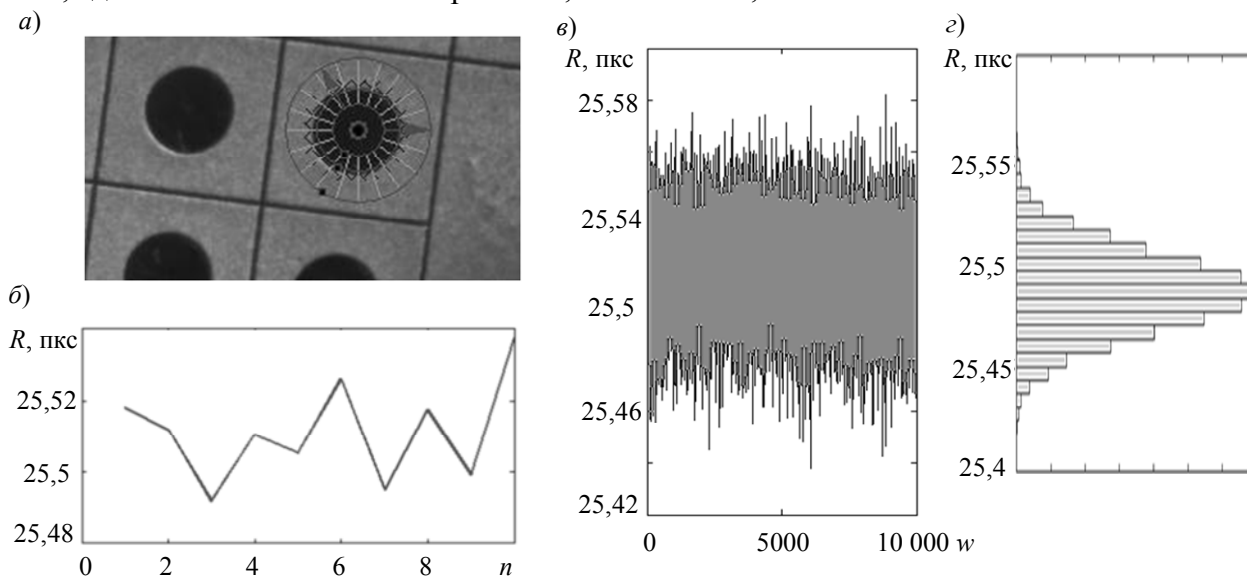


Рис. 3

**Заключение.** Представленный метод позволяет автоматически рассчитывать погрешности на основе регрессионных оценок и погрешности геометрических измерений на основе обработки изображений, что дает возможность избавиться от затратных повторных измерений. Новый метод оценки погрешностей измерений удобен для использования, при этом получаемые значения совпадают с полученными на основе эксперимента. На реализацию метода не влияют свойства поверхности измеряемого объекта.

Представленная работа является результатом междисциплинарного исследования в рамках Sonderforschungsbereich 622, которое проводится в Техническом университете г. Ильменау при содействии Deutschen Forschungsgesellschaft.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DIN V ENV 13005 — Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. DIN — Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin Beuth Verlag, 1999.
2. Kühn O. Ein Beitrag zur hochauflösenden zweidimensionalen Geometriemessung mit CCD-Zeilensensoren. Technische Universität Ilmenau, Diss., 1997.
3. Hultsch E. Ausgleichsrechnung mit Anwendungen in der Physik unter besonderer Berücksichtigung der Messtechnik. Akademische Verlagsgesellschaft GEEST und PORTIG K. G. Leipzig, 1971.
4. Papula L. Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3. Wiesbaden: Vieweg, 1994.
5. Wolf H. Ausgleichsrechnung. Bonn: Dümmler, 1975.

6. VDI/VDE 2617 Blatt 6.1 — Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung, Koordinatenmessgeräte mit optischer Antastung - Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit optischen Sensoren für laterale Strukturen. VDI - Verein Deutscher Ingenieure, VDE - Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik. Berlin: Beuth Verlag, 2005.
7. *Christoph R., Neumann H. J.* Multisensor Koordinatenmesstechnik. Landsberg/Lech: Verlag moderne Industrie, 2003.
8. *Cox M. G., Siebert B. R. L.* The use of a Monte Carlo method for evaluating uncertainty and expanded uncertainty // Metrologia. 2006. P. 178—188.
9. *Peters J. C.* Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der Mikro-Koordinatenmesstechnik. Karlsruher Institut für Technologie, 2010.
10. *Kacker R., Toman B., Huang D.* Comparison of ISO-GUM, draft GUM Supplement 1 and Bayesian statistics using simple linear calibration // Metrologia. 2006. P. 167—177.
11. Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement — Propagation of distributions using a Monte Carlo method. ISO — International Organization for Standardization. Genf: ISO, 2007.
12. *Wolf M., Müller M., Rösslein M.* Modellierung und Simulation komplexer Messvorgänge mittels der Monte-Carlo-Methode // Technisches Messen. 2007. Bd 74. S. 485—493.
13. DIN EN ISO 14253-1 Prüfen von Werkstücken und Messgeräten durch Messen, Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen. DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag, 1999.
14. *Wäldele F.* Die Messunsicherheit von Koordinatenmessungen in Normen // Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen VDI-Berichte. 2004. N 1867. S. 209—222.
15. *Bai A.* Der Einsatz von Simulationen zur Untersuchung von Fehlereinflüssen in der Interferometrie. Fraunhofer Institut Produktionstechnologie, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2004.
16. *Bibel W.* Wissenspräsentation und Inferenz. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1993.
17. *Weissensee K., Kühn O., Lins G., Töpfer S., Rosenberger M.* Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenpunkten bei der Geometriemessung. WO2009/141333 A1. 26.11.2009.

**Сведения об авторах**

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <b>Карина Вайсензее</b>            | — ТУ Ильменау; кафедра контроля качества;<br>E-mail: karina.weissensee@tu-ilmenau.de   |
| <b>Галина Александровна Польте</b> | — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: galinkan@rambler.ru |
| <b>Герхард Линс</b>                | — профессор; ТУ Ильменау; кафедра контроля качества  |

Рекомендована кафедрой  
мехатроники

Поступила в редакцию  
19.10.11 г.