

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 681.786.2

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРАЯ ОБЪЕКТОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ НА ИЗОБРАЖЕНИИ ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ РАЗМЕРНОГО КОНТРОЛЯ

© С. В. Двойнишников, В. В. Рахманов, И. К. Кабардин,
В. Г. Меледин, Д. О. Семенов

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
E-mail: dv.s@mail.ru*

Предложен способ определения края объектов цилиндрической формы на изображении с использованием проекционного теневого метода. Метод предусматривает применение телецентрической оптики и некогерентного источника освещения. Метод основан на определении края объекта на изображении по положению максимума производной зависимости интенсивности. Выполнены теоретические и экспериментальные оценки погрешности предложенного метода. Достигнут уровень погрешности измерений диаметра цилиндрических объектов на уровне $0,3 \cdot 10^{-5}$. Полученный результат подтверждает работоспособность и перспективность предложенного метода.

Ключевые слова: измерение диаметра, телецентрическая оптика, цифровая обработка изображений.

DOI: 10.15372/AUT20220105

Введение. В современной промышленности при использовании серийного конвейерного производства изделий необходимым этапом является оперативный контроль параметров готовой продукции [1]. Задача создания высокоточных бесконтактных измерительных систем для контроля геометрических размеров изготовленных изделий является актуальной для многих отраслей промышленности: машиностроительной, электротехнической, авиационной, микроэлектронной, атомной и др. Для этих целей на практике широко используются оптико-электронные системы благодаря их потенциально высокой точности и малому времени контроля. Существенно, что среди изделий большой класс составляют трёхмерные объекты постоянной толщины с чёткой теневой проекцией [2, 3]. Как правило, контроль таких объектов производится теневыми методами на основе проекционных телецентрических систем в проходящем свете.

Теневой проекционный метод в параллельном пучке [4, 5] получил наибольшее распространение в промышленном применении. Это связано с высокой надёжностью и инвариантностью результатов измерений к положению объекта в измерительном объёме.

Параллельный пучок света, формируемый источником, освещает измеряемый объект. Проецирующая система формирует в плоскости фотоприёмника теневое изображение объекта — тенеграмму. Фотоприёмник выполняет электронное сканирование теневого изображения по строкам. В процессе этого сканирования осуществляется предобработка сигнала: компенсация темновых токов, коррекция неравномерной чувствительности элементов фотоприёмника, сглаживание сигнала, световая коррекция. Отсчёты скорректированного сигнала, соответствующего элементам фотоприёмника, записываются во внутреннюю память измерителя. Используя эти отсчёты, можно определить размер объекта в каждом сечении. Проводится усреднение значений по всем сечениям объекта.

Метод оптического оконтуривания [6] позволяет находить форму изделий при достаточно лёгкой обработке тенеграммы с помощью программного обеспечения. При таком подходе нахождение края сводится к определению максимума функции интенсивности изображения.

Одной из важных составляющих проецирующей оптической системы является источник излучения. Им может быть точечный (как правило, лазерный [7]) или протяжённый поперёк оптической оси источник света. К последнему относятся осветители на основе светодиодов, которые за счёт высокой оптической мощности, дешевизны, малых габаритов, широкой диаграммы направленности и простоты управления пучком света находят широкое применение в измерительной технике. Такие источники имеют неоспоримое преимущество перед лазерными: формируемые в их свете изображения не содержат спекл-шумов благодаря усредняющим свойствам по пространству [8–12].

Алгоритм вычисления диаметра основан на определении расстояния между видимыми краями цилиндра на изображении. Пусть координаты левого и правого края цилиндра будут равны соответственно X_l и X_r . Тогда диаметр цилиндра может быть вычислен с помощью выражения

$$D = |X_r - X_l|. \quad (1)$$

Для определения координаты края объекта известны различные подходы. Наиболее часто в измерительной практике используют пороговый алгоритм обработки теневых изображений объектов, в котором выбор порога осуществляется исходя из размеров осветителя, типа освещения. Так, при когерентном освещении типичного плоского объекта (полуплоскости) и обработке его дифракционно-ограниченного изображения выбирается уровень, равный четверти всей падающей интенсивности света. При полностью некогерентном освещении этот порог равен половине входной интенсивности, а при частично-когерентном освещении объекта порог имеет промежуточное значение, которое определяется угловыми размерами источника [13–15]. Мы не рассматриваем случай абсолютной когерентности ввиду его невозможности использования на практике.

Очевидно, что для пороговых методов определения положения границы важно правильно выбрать аппроксимирующий профиль интенсивности на краю объекта и пороговый уровень, соответствующий истинному положению края. В случае неверного выбора значения порога или аппроксимирующей кривой алгоритм вычисления диаметра объекта приведёт к неверным результатам. Известны различные алгоритмы определения положения границ трёхмерного объекта, основанные на пороговом методе, которые имеют вышеуказанные недостатки [16–17]. В случае ограниченного динамического диапазона фотоприёмника корректно выбрать пороговые параметры будет невозможно и это приведёт к недостоверным результатам измерений.

Данная работа нацелена на создание способа определения края объектов цилиндрической формы на изображении в теневом методе размерного контроля в условиях ограниченного динамического диапазона фотоприёмника.

Описание метода. Дифракционно-оптическая схема формирования изображения представлена на рис. 1.

Источник света 1 с угловым размером w_{light} через объектив 2 освещает цилиндрический объект 3, который с помощью линз 4 и 6 проецируется на фотоприёмный экран 7. На фокусном расстоянии линзы 4 находится апертурная диафрагма 5 с угловым размером w_d .

Аналитическое выражение зависимости интенсивности от координаты теневого изоб-

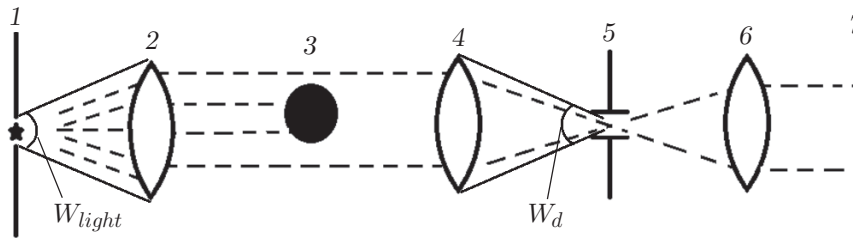


Рис. 1. Дифракционно-оптическая схема формирования изображения цилиндрического объекта

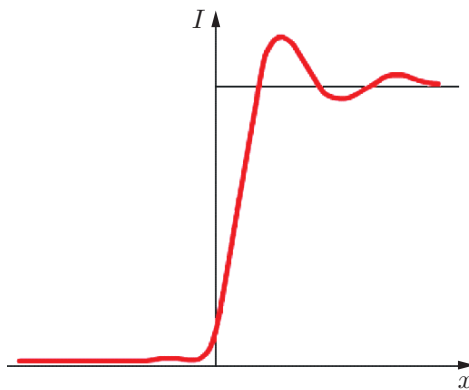


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость интенсивности от координаты теневого изображения края, формируемого протяжённым источником освещения

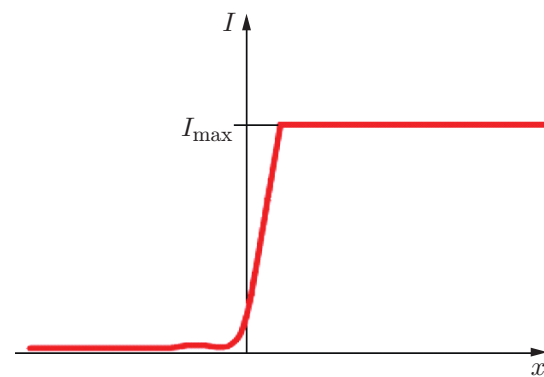


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость интенсивности от координаты теневого изображения края, формируемого протяжённым источником освещения в условиях ограниченного динамического диапазона фотоприёмника

ражения края, формируемого протяжённым источником освещения, имеет вид

$$I(x) = k \int_{-w_{light}}^{w_{light}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(x - \xi) e^{-i w_l(x - \xi)} \frac{\sin w_d \xi}{\pi \xi} H(x - \eta) e^{i w_l(x - \eta)} \frac{\sin w_d \eta}{\pi \eta} d\xi d\eta dw_l, \quad (2)$$

где k — нормировочный коэффициент, $H(y)$ — единичная ступенчатая функция Хевисайда:

$$H(y) = \begin{cases} 0, & y < 0; \\ 0,5, & y = 0; \\ 1, & y > 0. \end{cases} \quad (3)$$

Зависимость интенсивности, описываемая выражением (2), представлена на рис. 2.

При анализе функции зависимости интенсивности зарегистрированного освещения от координаты, как правило, авторы не учитывают узкий динамический диапазон матрицы фотоприёмника. В результате зависимость, регистрируемая фотоприёмником, обрезается в светлой области и имеет вид, как показано на рис. 3.

В связи с пространственной неравномерностью фоновой интенсивности выбор неверного порога приведёт к увеличению погрешности измерений.

Известны алгоритмы определения границы объекта на изображении по максимальному значению производной интенсивности [18–20]. Такой подход в случае недостаточности динамического диапазона фотоприёмника является более перспективным, так как позволяет корректно оценить координаты границ объекта.

Для снижения влияния шумов на изображении применена низкочастотная фильтрация с окном осреднения, равным двум межпиксельным расстояниям. Таким образом, координаты края объекта на теневом изображении можно определить по следующему алгоритму:

- 1) получаем одномерный массив $I(x)$, соответствующий интенсивности в поперечном направлении на теневом изображении;
- 2) вычисляем грубую оценку положения краёв, например, по резкому скачку интенсивности в анализируемом массиве;
- 3) выбираем отдельный массив для каждого края с окрестностью ± 20 пикселей;
- 4) выполняем фильтрацию нижних частот для получения эффекта сглаживания (например, можно использовать оконную фильтрацию с окном сглаживания 3 пикселя);
- 5) дифференцируем полученный массив;
- 6) находим координату с максимальным значением, используя квадратичную интерполяцию.

В представленном алгоритме окрестность ± 20 пикселей выбирается из следующих соображений. Во-первых, такая широкая окрестность гарантирует попадание в неё края объекта даже при наличии высокого уровня шума на регистрируемых изображениях. Во-вторых, при выполнении низкочастотной фильтрации для исключения влияния искажений на краях отсчёты полученной функции использоваться не будут, вследствие чего фактический размер окрестности уменьшается на 6 пикселей. Далее в результате дифференцирования будет получена интересующая нас функция, которая может быть на несколько пикселей смещена относительно центра. Для исключения эффекта обрезания этой функции на краях выбирается окрестность с запасом.

Экспериментальные исследования. Предложенный метод применён в измерителе диаметра цилиндрических изделий размерами 7–10 мм. В качестве источника освещения использовались два светодиодных осветителя белого цвета мощностью 10 Вт. Применялся фотоприёмник Imaging Source DMK33GX264 [21] с телецентрическим объективом TC23024 [22]. Оптическая схема настроена таким образом, что размер одного пикселя на изображении составлял 9,85 мкм. Диаметр цилиндрического объекта измерялся на всех возможных срезах, и вычислялось среднее значение. Типичная зависимость интенсивности от координаты на краю цилиндра представлена на рис. 4.

Высота измеряемых цилиндров составляла $L = 12$ мм. Учитывая, что один пиксель на зарегистрированных изображениях равен 9,85 мкм, на каждом цилиндре выполнялись измерения в $N = 1200$ срезах. Опираясь на гипотезу нормальности распределения погрешности измерений по изображению, погрешность измерений можно оценить как

$$\varepsilon = 2 \frac{p}{\sqrt{N}} = 2 \frac{p}{\sqrt{L/p}} = 0,58 \text{ мкм}, \quad (4)$$

где применяется множитель 2, поскольку нужно измерить координаты двух противоположных краёв объекта.

Для экспериментальной оценки погрешности измерены эталонные цилиндры различного диаметра, которые изготовлены из стали и имеют неравномерность диаметра по длине на уровне 1 мкм. Диаметр эталонных цилиндров контролировался 10 измерениями контактным микрометром «МКЦ-25 0.001». Результаты представлены в табл. 1. Каждый цилиндр измерялся проекционным теневым методом 30 раз для оценки среднеквадратичного отклонения, и выполнялось осреднение по всем срезам цилиндра на изображении (за

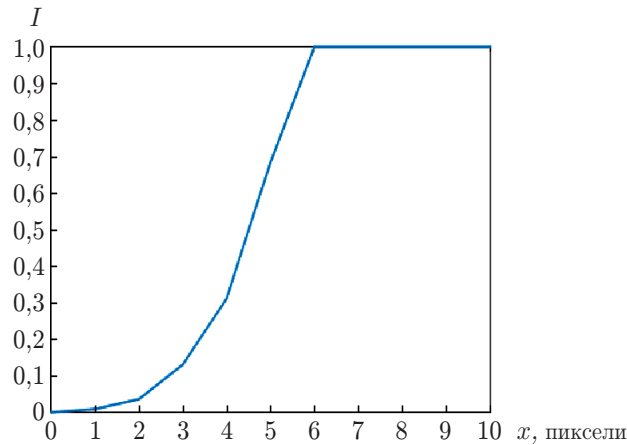


Рис. 4. Зависимость интенсивности от координаты края цилиндрического объекта на изображении в условиях ограниченного динамического диапазона фотоприёмника

Таблица 1

Номер эталонного цилиндра	Диаметр эталонного цилиндра, измеренный микрометром, мкм	Среднее значение диаметра эталонного цилиндра, измеренного проекционным теневым методом, мкм	Среднеквадратичное отклонение значения диаметра эталонного цилиндра, измеренного проекционным теневым методом, мкм	Максимальная ошибка измерения проекционным теневым методом относительно диаметра, измеренного микрометром, мкм
1	8100	8100	0,11	0,93
2	8140	8141	0,06	2,03
3	8180	8180	0,12	0,94
4	8220	8220	0,24	1,38
5	8250	8251	0,12	1,6

исключением 50 пикселей с каждой стороны для исключения искажений на краях цилиндров), всего около 1200 срезов в зависимости от реальной ширины цилиндра.

Необходимо учесть, что температура эталонов в процессе измерений могла меняться на несколько градусов из-за нагрева от рук экспериментатора. Пусть флуктуация температуры измеренных образцов не превышает 5 градусов. В этом случае погрешность, вызванную температурным расширением измеренных образцов, можно оценить сверху значением 0,49 мкм:

$$\delta = \alpha \Delta T D = 1,2 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 8150 = 0,49 \text{ мкм.} \quad (5)$$

Коэффициент температурного расширения $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ [23], $\Delta T = 5$, $D = 8150 \text{ мкм}$. Таким образом, можно считать, что отклонение диаметра эталонных образцов не превышает 1,5 мкм. Видно, что результаты измерений согласуются с этой оценкой: максимальное отклонение результата измерения от эталонного значения составило 1,6 мкм. Среднеквадратичное отклонение результата измерений не превышает 0,24 мкм. Полученная погрешность оказалась ниже аналитической оценки. По-видимому, это связано с использованием субпиксельной оценки координаты края, которая не учитывалась в приведённой оценке. Достигнутый уровень погрешности соответствует относительной

погрешности $2,4 \cdot 10^{-5}$, что подтверждает работоспособность и перспективность предложенного метода.

Заключение. В данной работе предложен способ определения края объектов цилиндрической формы на изображении с использованием проекционного теневого метода. Метод предусматривает применение телецентрической оптики и некогерентного источника освещения. Метод использует определение положения края объекта на изображении по положению максимума производной зависимости интенсивности. Выполнены теоретические и экспериментальные оценки погрешности предложенного метода. Для экспериментальной оценки выполнены многократные измерения 5 калибровочных цилиндров различных диаметров. Достигнуто среднеквадратичное отклонение результатов измерений диаметра цилиндрического объекта на уровне 0,24 мкм при настройке системы для измерения объектов диаметром до 10 мм, что соответствует относительной погрешности измерений $2,4 \cdot 10^{-5}$. Полученный результат подтверждает работоспособность и перспективность предложенного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dvoynishnikov S. V., Kabardin I. K., Meledin V. G.** Advanced Phase Triangulation Methods for 3D Shape Measurements in Scientific and Industrial Applications // Machine Vision and Navigation. Eds. O. Sergiyenko, W. Flores-Fuentes, P. Mercorelli. Cham: Springer, 2020. P. 675–711. DOI: 10.1007/978-3-030-22587-2_21.
2. **Rakhmanov V. V., Dvoynishnikov S. V., Semenov D. O.** Diameter measurement of cylindrical products with displacement compensation along the optical axis // Intern. Journ. Circuits, Syst. and Signal Process. 2020. **14**. P. 169–174. DOI: 10.46300/9106.2020.14.26.
3. **Rakhmanov V. V., Dvoynishnikov S. V., Semenov D. O., Glavny V. G.** Cylinder diameter measurement with displacement and rotation error correction for non-telecentric optics // IOP Journ. Phys.: Conf. Ser. 2020. **1675**. 012085. DOI: 10.1088/1742-6596/1675/1/012085.
4. **Murphy D. B.** Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging. New York: John Wiley & Sons, 2001. 385 p.
5. **Жимулева Е. С., Завьялов П. С., Кравченко М. С.** Разработка телецентрических объективов для систем размерного контроля // Автометрия. 2018. **54**, № 1. С. 61–70. DOI: 10.15372/AUT20180109.
6. **Чугуй Ю. В.** Особенности формирования и оконтуривания изображений объёмных тел в когерентном свете // Автометрия. 1991. № 4. С. 103–112.
7. **Крылов К. И., Прокопенко В. Т., Митрофанов А. С.** Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. Л.: Машиностроение, 1978. 336 с.
8. **Франсон М., Сланский С.** Когерентность в оптике. М.: Наука, 1967. С. 80.
9. **Ландсберг Г. С.** Оптика. М.: Наука, 1976. 451 с.
10. **Папулис А.** Теория систем и преобразований в оптике. М.: Мир, 1971. 494 с.
11. **Горелик Г. С.** Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику / Под ред. С. М. Рытова. 3-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 656 с.
12. **Ахманов С. А.** Физическая оптика / Под ред. С. А. Ахманова, С. Ю. Никитина. М.: МГУ, 1998. 654 с.
13. **Chugui Yu. V.** Constructive theory of formation and filtering the optical imaging and Fraunhofer diffraction patterns of 3D opaque object of constant thickness in coherent light // Proc. SPIE. 1996. **2655**. P. 287–298.

14. **Chugui Y. V., Senchenko E. S.** 3D image formation in transmitted partially coherent and incoherent light applied to dimensional inspection // Proc. of the 11th Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry. Tsukuba, Japan, 02-05 Sept., 2014. P. 363–367.
15. **Chugui Yu. V., Krivenkov B. E.** Fraunhofer diffraction by bodies of constant thickness // JOSA A. 1989. **6**. P. 617–626.
16. **Chugui Y. V., Senchenko E. S.** High precision algorithms for 3D objects shadow inspection in partially coherent light // Key Eng. Mater. 2014. **613**. P. 151–156.
17. **Senchenko E. S., Chugui Yu. V.** Shadow inspection of 3D objects in partially coherent light // Measur. Sci. Rev. 2011. **11**, N 4. P. 104–107.
18. **Жимулева Е. С.** Разработка и создание оптико-электронных теневых проекционных систем для размерного контроля трёхмерных объектов с повышенной точностью в промышленном производстве // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2017. 20 с.
19. **Rashmi M. K., Rohini S.** Algorithm and technique on various edge detection: A survey // Signal & Image Process.: An Intern. Journ. (SIPIJ). 2013. **4**, N 3. P. 65–75.
20. **Blackledge J. M.** Digital Image Processing: Mathematical and Computational Methods. Chichester: Elsevier, 2005. 824 p.
21. **DMK 33GX264.** GigE monochrome industrial camera. URL: <https://www.theimagingsource.com/products/industrial-cameras/gige-monochrome/dmk33gx264> (дата обращения: 17.09.2021).
22. **ТС23024.** Bi-telecentric lens. URL: <https://www.opto-e.com/products/matrix-detector-telecentric-lens-model-TC23024> (дата обращения: 17.09.2021).
23. **Таблицы физических величин.** Справочник /Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.

Поступила в редакцию 17.09.2021

После доработки 03.11.2021

Принята к публикации 08.11.2021
