

ИЗМЕРЕНИЕ ДИАМЕТРОВ ЦИЛИНДРОВ МЕТОДОМ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Дистанционные измерения геометрических размеров изделий машиностроения с помощью электромагнитных волн оптического диапазона делятся на когерентные (дифракционные, интерференционные, спеклструктуры) и некогерентные; с построением изображения или без построения; с фильтрацией на оптических частотах или после преобразования в электрический сигнал. Когерентные оптические системы являются наиболее универсальными и позволяют производить параллельную обработку двумерных полей со скоростью распространения света, но высокие требования к качеству элементной базы и среды распространения связывают применение когерентных схем с развитием интегральной оптики. Поэтому более широко в производственных условиях используются некогерентные по принципу действия установки, хотя источником света в них может служить и лазер, особенно там, где необходима спектральная селекция, высокие пиковые мощности, малая расходимость пучка. К числу основных потребителей оптикоэлектронных, в том числе и лазерных, измерительных приборов относятся производства со 100 %-ным выходным контролем [1], т.е. авиастроительные фирмы и изготовители аэрокосмической техники.

В последнее время происходят существенные изменения в характере контроля линейных размеров в машиностроении - переход от ручных, визуальных методов к автоматизированным и дистанционным. Автоматизированные измерения обеспечивают объективность контроля, высокие точность и производительность дают возможность оперативно изменять ход технологического процесса, снижая или вовсе исключая брак по причине выхода геометрических размеров за допуски к оптико-электронным системам для промышленного применения предъявляются следующие требования: быстрый вывод результатов на монитор, надежность функционирования в неблагоприятных условиях, соответствие принятым стандартам, контроль аппаратных и программных ошибок [2].

Измерение диаметра детали цилиндрической формы и его приращения одна из наиболее распространенных контролируемых процедур, для реализации которой методами обработки изображений был предложен следующий алгоритм [3]. Суть алгоритма поясняется рис.1. На изображении цилиндра периодически измеряются ординаты точек пересечения границ цилиндра с двумя, расположенными на расстоянии l друг от друга вертикалями $x_1 = \text{const}_1$ и $x_2 = \text{const}_2$ y_1, y_2, y_3, y_4 . Для каждого кадра вычисляется диаметр:

$$d = (y_2 - y_3) \cos \arctg \frac{y_2 - y_1}{l}; \quad (1)$$

ордината центра изображения цилиндра:

$$y_c = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4}; \quad (2)$$

и его наклон:

$$\alpha = \arctg \frac{y_2 - y_1}{l}, \quad (3)$$

и поле зрения телекамеры. Предложенный алгоритм интересен тем, что диаметр и наклон цилиндра вычисляются как разности соответствующих координат, и, следовательно, результаты его работы инвариантны к смещениям и поворотам цилиндра в поле зрения.

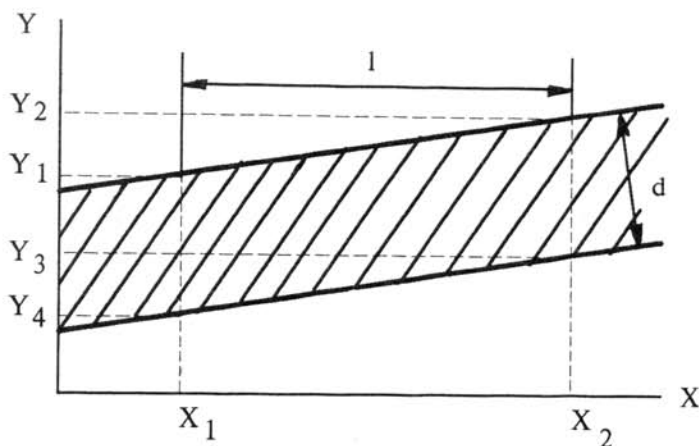


Рис.1. Схема измерений. Вид изображения цилиндра в поле зрения прибора.

Приращение диаметра определяется как разность следующих друг за другом измерений:

$$\Delta d = d_{i+1} - d_i \quad (4)$$

Если это приращение есть следствие обработки по образующей вращающейся детали (точение на токарном станке, наплавка, напыление и т.п.), то за толщину напыляемого покрытия можно принять половину приращения.

Чтобы реализовать алгоритм измерения диаметра или его приращения, необходимо выделить изображение цилиндра из фона и определить точные положения его границ. Вначале осуществляется приближенное выделение границ методом наибольшего градиента. Для этого вычисляются суммарные освещенности каждой строки $E_{i,\Sigma}$, а также значения разностей освещенностей $dE_{i,\Sigma} = E_{i+1,\Sigma} - E_{i,\Sigma}$. Положения строк с минимальным и максимальным значениями разности определяют приблизительное местоположение границ цилиндра. В результате все поле зрения разделяется на три области: две области - фон и одна - цилиндр, вычисляются средние освещенности фона E_b и цилиндра E_c и назначаются пороговые уровни обработки. Некоторая точка изображения $A(x,y)$ относится к области фона S_b или цилиндра S_0 , если:

$$A(x,y) \in \begin{cases} S_b, & E_A \geq p(E_b + E_c) \\ S_0, & E_A < p(E_b + E_c), \end{cases} \quad (5)$$

где E_A - освещенность изображения в точке А; p - порог.

Определение точного положения координат границ цилиндра и точек других его характеристик включает следующие этапы:

- пороговую обработку;
- достижение разрешения менее размеров одного пиксела изображения;
- исключение систематических ошибок, обусловленных аберрациями;
- вычисление коэффициентов уравнений прямых, аппроксимирующих верхнюю и нижнюю границы изображения цилиндра;
- вычисление ординат точек пересечения границ с вертикалями $x_1 = \text{const}_1$ и $x_2 = \text{const}_2$ и характеристик цилиндра (см. (1)...(4)).

Пороговая обработка проводится по каждому столбцу изображения. С целью повышения помехоустойчивости процедуры выделения координат границ изображения цилиндра к точечным дефектам оптического тракта и ПЗС-матрицы окончательное решение об отнесении точки к изображению цилиндра или фона принимается, если 10 последующих точек также принадлежат той же области по условию (5). Это, естественно, ограничивает динамический диапазон измеряемых значений диаметров снизу 10

пикселями изображения и допустимые наклоны цилиндра в поле зрения телекамеры сверху.

Жесткий растр твердотельных ПЗС-матриц выгодно отличает их от электровакуумных двумерных преобразователей (видиконов, суперортиконов и т.п.). Размеры одной ячейки ПЗС-матриц серийного производства колеблются от 8 до 30 мкм [4, 5]. Многофазная структура каждого элемента и тот факт, что фотогенерированные заряды можно накапливать под произвольно выбранным электродом элемента с многофазной структурой, позволяет фиксировать положение фрагмента изображения с точностью до долей размера фоточувствительной ячейки. Эта доля обратно пропорциональна удвоенному значению числа фаз элемента [6].

Для ПЗС-телекамеры КТМ-1 с матрицей К1200ЦМ7, размер элемента которой 18x19 мкм, а число фаз управления 3, разрешение, достигнутое оптимизированной процедурой считывания зарядовых пакетов, составит 3 мкм. Однако, во-первых, здесь потребуется на одно измерение обрабатывать не один, а три кадра изображения при фиксации измеряемого объекта относительно телекамеры. Во-вторых, подвергается перестройке схемотехническое решение телекамеры.

Улучшить разрешение в определении координат границ цилиндра возможно программными средствами, используя алгоритм, предложенный в работе [7]. Он заключается в аппроксимации величины освещенности в области границы цилиндра прямой линией, но авторы привели лишь качественные аргументы и экспериментальные результаты в пользу выбранной аппроксимации и ее реализации.

Теоретическое обоснование этого алгоритма состоит в следующем. Пусть кадр содержит изображение темного цилиндра на светлом фоне. Вследствие аберраций или преднамеренной дефокусировки изображение границы будет размыто и займет несколько пикселей матричного фотоприемника в направлении, перпендикулярном линии границы, причем вблизи границы зависимость освещенности изображения от ординаты линейна (рис.1):

$$E = my + c, \quad (6)$$

где m и c постоянные коэффициенты, которые вычисляются методом наименьших квадратов по небольшому (3...7) числу отсчетов [7].

Для упрощения расчетов предположим, что при переходе от цилиндра к фону освещенность изменяется от $E_b=0$ до $E_c=1$. Истинное положение границы y_0 в этом случае будет соответствовать уровню $E_0=0,5$. Если граница растягивается на n пиксел, то $i=1$ будет соответствовать $E_1=0$, а $i=n$ $E_n=1$.

Тогда

$$m = \frac{1}{n-1}, \quad (7)$$

и

$$y_0 = \frac{E_0 - c}{m}. \quad (8)$$

Погрешность измерения ординаты границы Δy_0 находим дифференцированием выражения (8):

$$\Delta y_0 = \frac{\Delta E + \Delta c}{m} + \frac{\Delta m}{m^2} (E_0 - c), \quad (9)$$

где ΔE , Δc и Δm - абсолютные погрешности соответствующих величин. При проведении анализа погрешностей координатных измерений предположим, что прямая (6) проходит через начало координат, т.е. $c=0$. После чего подставив $E_0=0,5$ и (7) в (9), получим:

$$\Delta y_0 = \frac{\Delta E + \Delta c}{m} + 0,5 \frac{\Delta m}{m^2}. \quad (10)$$

Статистические погрешности определения коэффициентов прямой m и c при равновзвешенной точности измерений освещенности как по координатам, так и по уровням $\sigma_E = \text{const}$ приведены в работе [8]:

$$\Delta c = \sigma_E \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{y}^2}{D}}; \quad (11)$$

$$\Delta m = \frac{\sigma_E}{\sqrt{D}}; \quad (12)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \quad (13)$$

$$D = \sum y_i^2 - n\bar{y}^2; \quad (14)$$

$$n = 3, 5, 7, \dots, 2k-1, \quad (15)$$

где n интерпретируется как число пиксел, на которое растянуто изображение границы. Из условия $c=0$ следует, что

$$y_1=0, y_2=1, y_3=2, \dots, y_i=i-1. \quad (16)$$

Кроме того, примем $\sigma_E = \Delta E$. В результате получается удобное для расчетов и анализа выражение

$$\Delta y_0 = \left[1 + \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{y}^2}{D} + 0,5(n-1)} \right] \Delta E (n-1). \quad (17)$$

Как видно из (17), между Δy и ΔE существует прямая пропорциональная зависимость, т.е. путем уменьшения погрешностей измерения освещенности можно добиться точного определения положения границы. С другой стороны, увеличение числа отсчетов, используемых для построения прямой методом наименьших квадратов, наоборот, вызывает увеличение погрешности Δy .

Численные расчеты потенциальной точности измерения положения границ выполнены с помощью выражений (13)...(17) для практически важных случаев, когда линейный закон изменения освещенности на изображении границы цилиндра соблюдается на расстоянии $n=3, 5, \dots, 15$ пиксел, а фотоприемник различает $1, 2, 4, \dots, 128$ градаций освещенности, т.е. для $\Delta E=1/2, 1/4, \dots, 1/256$. Результаты расчетов приведены на рис.2. Все поле графика пунктирной горизонтально разделено на две области по уровню $\Delta y_0 = 0,5$. Интерес представляет область, заключенная между осью ΔE и пунктирной линией. Внутри этой области применение аппроксимирующего алгоритма дает выигрыш в разрешении по координате и потому имеет смысл. Малая разориентация границы цилиндра относительно ПЗС-матрицы не сказывается на точности отсчетов [9].

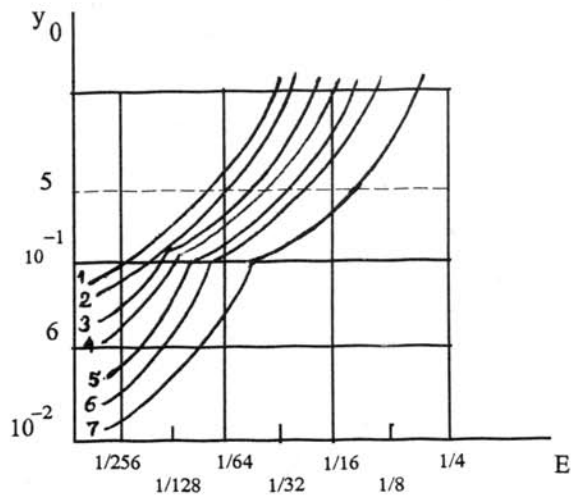


Рис.2. Погрешность измерения ординаты границы цилиндра: Δy - погрешность измерения в пикселах; ΔE - разрешение телекамеры по освещенности в относительных единицах: 1- $n=15$, 2- $n=13$, 3- $n=11$, 4- $n=9$, 5- $n=7$, 6- $n=5$, 7- $n=3$.

Описанный алгоритм повышения пространственной разрешающей способности реализуется тем, что пороговая обработка проводится по крайней мере 3 раза. Положение границ цилиндра в каждом столбце изображения определяется по порогам p_i ($i=3,5,\dots,2k-1$). Затем в каждом столбце рассчитывается точная ордината границы с помощью выражения (8).

Систематические ошибки в определении координат, обусловленные аберрациями исключаются с помощью табличной коррекции, суть которой состоит в использовании предварительно полученных данных по контрольным образцам [7]. Таким образом, по каждому кадру изображения формируются два массива ординат для верхней и нижней границ цилиндра. Коэффициенты уравнений границ, которые предлагаются прямыми, рассчитываются также методом наименьших квадратов, используя данные, содержащиеся в массивах.

На заключительном этапе вычисляются ординаты точек пересечения границ с вертикалями $x_1=\text{const}_1$ и $x_2=\text{const}_2$ и другие характеристики цилиндра (1)...(4).

Измеритель диаметров состоит из комплекса приборов: ПЗС-телекамеры КТМ-1, устройства ввода-вывода изображений, ПЭВМ, блоков питания. Структура прибора представлена на рис.3. Устройство ввода-вывода изображений предназначено для ввода, хранения и вывода изображений, представленных стандартным телевизионным сигналом. Основные его характеристики следующие: внутренний формат изображения $256 \times 256 \times 8$ бит, число градаций серого при выводе изображения 256, число градаций серого при вводе изображения 64; время одного кадра изображения 20 мс, интерфейс - шина типа Q-BUS. Все детали устройства ввода-вывода смонтированы на одной плате, которая занимает одно свободное плато-место в корзине ПЭВМ.

Экспериментальные оценки технических характеристик прибора проводились на оптическом стенде с использованием контрольных образцов. Контрольные образцы представляли собой металлические цилиндры со шлифованной и аннодированной поверхностью. Геометрические параметры эталонных образцов контролировались на измерительном двухкоординатном приборе ДИП-1 проекционным методом с погрешностью ± 4 мкм. Конусность и эллипсность образцов не выходили за пределы допустимой погрешности прибора ДИП-1, а диаметры имели значение: 2,173 мм, 6,856 мм, 8,673 мм, 13,671 мм.

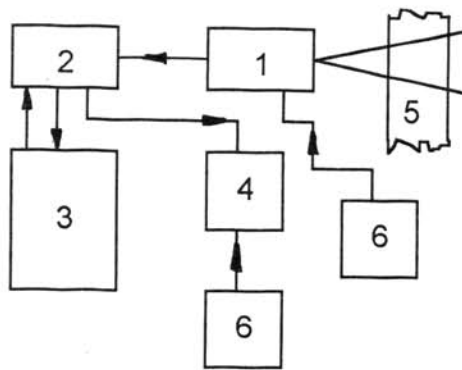


Рис.3. Функциональная схема измерителя диаметров

1 - ПЗС-телекамера КТМ-1; 2 - устройство ввода-вывода изображений; 3 - ПЭВМ; 4 - графический монитор; 5 - измеряемый цилиндр; 6 - блок питания.

Экспериментально исследовались зависимости измеренного прибором диаметра контрольного образца от его поступательного смещения, угла поворота, контраста и порога, а также повторяемость результатов. Эти зависимости представлены на рис.4-рис.6, соответственно. Контраст освещенности K изображения фона и цилиндра рассчитывался стандартно с помощью выражения:

$$K = \frac{E_b - E_c}{E_b + E_c} \quad (18)$$

Как видно из рис.4, поступательное смещение образца, поперечный размер которого занимает ~30 % поля зрения, вызывает разброс измеренных значений диаметра не более 1%. Для тонкого контрольного образца $D=2,173$ мм этот разброс не превышает 5%. Тем не менее последнее обстоятельство указывает на необходимость согласования оптического увеличения с характеристиками объекта измерения в заданном интервале величины диаметров. Поворот образца в поле зрения на угол $-10^\circ < \alpha < 10^\circ$ также дает разброс измеренных значений диаметра не более 1% (см,рис.5). Изменение контраста в пределах от 0,1 до 0,35 также мало сказывается на результатах измерений (см.рис.6).

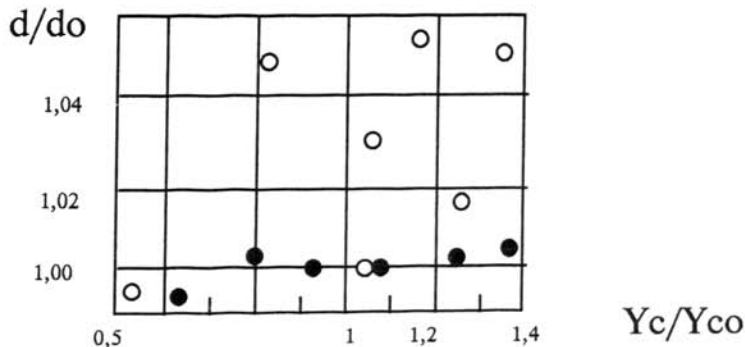


Рис.4. Зависимость измеренного значения диаметра от поступательного смещения образца в предметной плоскости

d - измеренное значение диаметра при произвольной координате центра цилиндра в поле зрения прибора Y_c ; d_0 - измеренное значение диаметра, когда образец находится в центре поля зрения Y_{c0} .

- - диаметр контрольного образца 2,173 мм;
- - диаметр контрольного образца 13,671 мм.

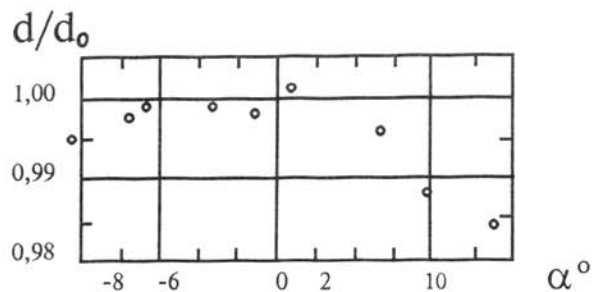


Рис.5. Зависимость измеренного значения диаметра от поворота образца

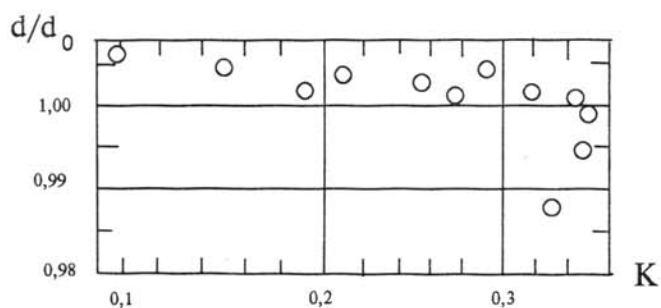


Рис.6. Зависимость измеренного значения диаметра от контраста

ЛИТЕРАТУРА

1. Schell, prazis und berubrungslos: Qualitats-sicherung und Prufung von Werkstucken mit Laser. Industriemeister, 1989, N 11, p.251-252.
2. Soobitsky J.A. Scanning laser diameter gages for industrial use. Proc.Soc.Photo-Opt.Instrum. Eng., 1988, N 959, p.193-224.
3. Гаврилов И.Н., Гришанов В.Н., Мордасов В.И., Поляков С.И. Толщиномер для установки электронно-лучевого напыления:- Тезисы докл.междунар.конфер. "Лазерная техника и технология".- Вильнюс,. Изд-во ВЦЛТ, 1991, стр.17-19.
4. Oda Eiji, Nagana Kenji, Tanaka Takanori et all. A 1920(H)x1035(V) pixel high-definition CCD image sensor. JEEE J.Solid-State circuits, 1989, v.24, N 3, p.711-717.
5. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л. Приемники оптического излучения.- М.: Радио и связь, 1987. 296 с.
6. Арутюнов В.А., Слободян С.М. Исследование ПЗС-датчика волнового фронта адаптивно-оптической системы фокусировки излучения. ПТЭ, 1985, N 1, стр.160-162.
7. Богомолов Е.Н., Василец Н.В., Кривенко Б.Е. и др. Фотодиодный оптико-электронный измеритель размеров "сенсор".- Автометрия, 1989, N 5, стр.83-91.
8. Сквайрс Дж. Практическая физика.- М.: Мир, 1971. 246 с.
9. Предко К.Г. Передаточные функции бездиффузионных фотоприемников с зарядовой связью.- В сб.: Лазерная оптико-электронная техника. - Минск: Изд.Университетское, 1989, стр.183-185.

Measurement of cylinder diameters using the method of image processing

V.N. Grishanov, V.I. Mordasov, A.V. Pigarev

Abstract

Remote measurements of geometric dimensions of engineering products using electromagnetic waves of the optical range are classified into coherent (diffraction, interference, speckle structures) and incoherent; with imaging or without imaging; with filtration at optical frequencies or after transformation into an electrical signal. Coherent optical systems are the most universally applicable and allow parallel processing of two-dimensional fields with the speed of light propagation, but high requirements to the quality of the hardware components and propagation medium make the use of coherent circuits dependent on the development of integrated optics. Therefore, incoherent installations are used more widely in production conditions, although the laser can also serve as a light source, especially in the situations where spectral selection, high peak powers, and low beam divergence are necessary. The main consumers of optoelectronic measuring instruments, including laser measuring instruments, are the production enterprises with 100% output control [1], i.e. aircraft and aerospace manufacturers.

Citation: Grishanov VN, Mordasov VI, Pigarev AV. Measurement of cylinder diameters using the method of image processing. Computer Optics 1995; 14-15(1): 90-96.

References

- [1] Schell, prazis und berubrungslos: Qualitats-sicherung und Prufung von Werkstucken mit Laser. Industriemeister; 1989; 11: 251-252.
- [2] Soobitsky JA. Scanning laser diameter gages for industrial use. Poc.Soc.Photo-Opt.Instrum. Eng.; 1988; 959: 193-224.
- [3] Gavrilov IN, Grishanov VN, Mordasov VI, Polyakov SI. Thickness gauge for electron-beam sputtering set. Abstracts of international conference "Laser equipment and technology"; Vilnius, VTsLT Publisher; 1991; 17-19.
- [4] Oda Eiji, Nagana Kenji, Tanaka Takanori et al. A 1920(H)x1035(V) pixel high-definition CCD image sensor. IEEE J.Solid-State circuits; 1989; 24(3): 711-717.
- [5] Aksenenko MD, Baranochnikov ML. Receivers of optical radiation; Moscow: Radio i Svyaz; 1987; 296.
- [6] Arutyunov VA, Slobodyan SM. The study of a CCD wave front sensor of an adaptive optics radiation focusing system. Instrum. Exp. Tech; 1985; 1: 160-162.
- [7] Bogomolov EN, Vasilets NV, Krivenko BE et al. Photodiode electrooptical dimension gauge "sensor". Avtometriya; 1989; 5: 83-91.
- [8] Squires J. Practical Physics; Moscow: Mir Publisher; 1971; 246.
- [9] Predko KG. Transfer functions of charge-coupled diffusion-free photodetectors. Collection of works Laser optoelectronic technology; Minsk: Universitetskoe Publisher; 1989; 183-185.