

ИЗМЕРЕНИЕ ДИАМЕТРОВ ЦИЛИНДРОВ МЕТОДОМ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Дистанционные измерения геометрических размеров изделий машиностроения с помощью электромагнитных волн оптического диапазона делятся на когерентные (дифракционные, интерференционные, спектральные) 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 контролирующих 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:

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

ордината центра изображения цилиндра:

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

и его наклон:

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

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.

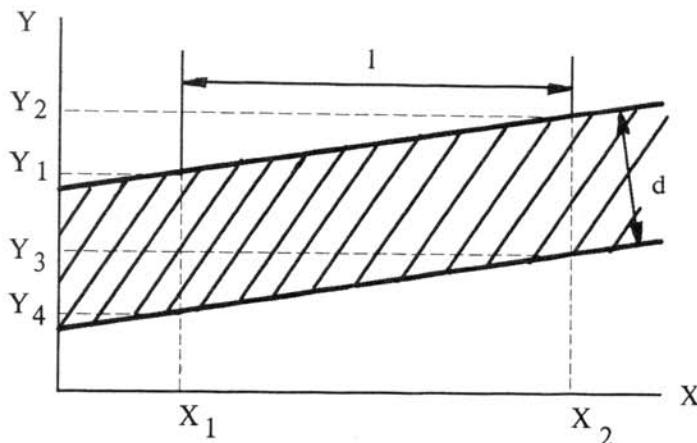


Рис.1. Схема измерений. Вид изображения цилиндра в поле зрения прибора.

Приращение диаметра определяется как разность следующих друг за другом измерений:

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

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 освещенности $dE_{i,\Sigma} = E_{i+1,\Sigma} - E_{i,\Sigma}$. 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 пикселя изображения;
- исключение систематических ошибок, обусловленных aberrациями;
- 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 aberrаций или преднамеренной дефокусировки изображение границы будет размыто и займет несколько пикселов 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 практических 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 оказывается на точности отсчетов [9].

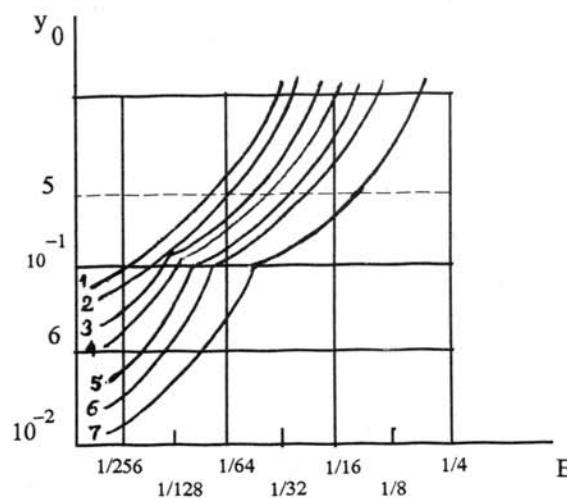


Рис.2. Погрешность измерения ординаты границы цилиндра: Δy - погрешность измерения в пикселях; ΔE - разрешение телекамеры по освещенности в относительных единицах: 1- $n=15$, 2- $n=13$, 3- $n=11$, 4- $n=9$, 5- $n=7$, 6- $n=5$, 7- $n=3$.

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 256x256x8 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 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 анодированной 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.

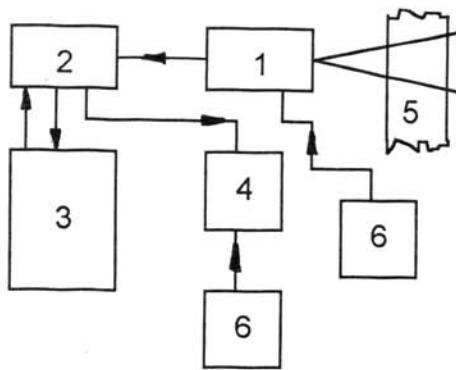


Рис.3. Функциональная схема измерителя диаметров

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).

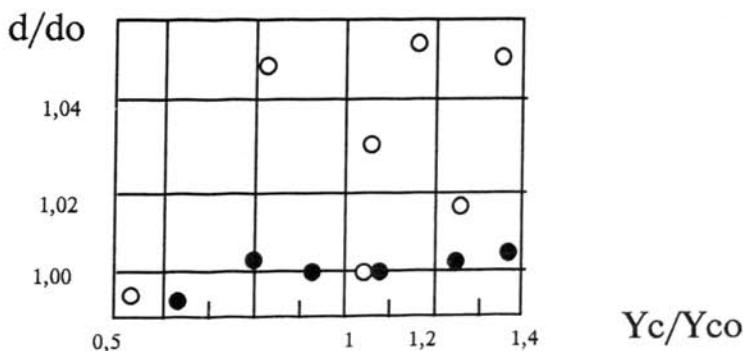


Рис.4. Зависимость измеренного значения диаметра от поступательного смещения образца в предметной плоскости

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_{co} .

○ - диаметр контрольного образца 2,173 мм;

● - диаметр контрольного образца 13,671 мм.

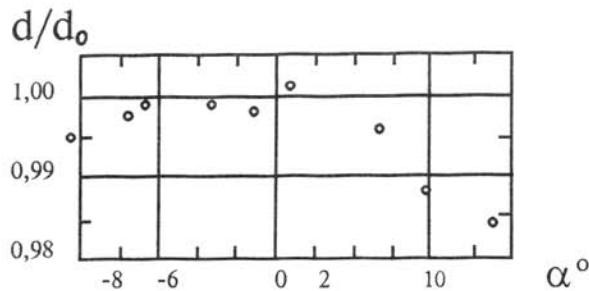


Рис.5. Зависимость измеренного значения диаметра от поворота образца

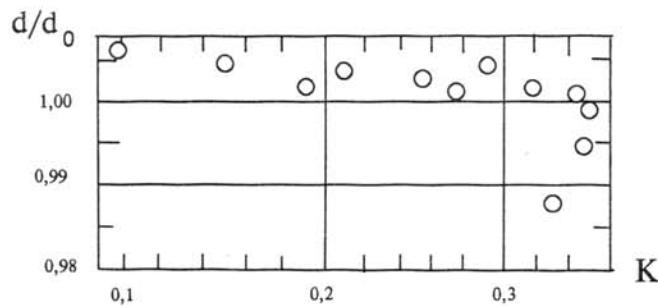


Рис.6. Зависимость измеренного значения диаметра от контраста

ЛИТЕРАТУРА

1. Schell, praxis und berubrungslos: Qualitats-sicherung und Prufung von Werkstücken mit Laser. Indusrtiemeister, 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. IEEE 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.