

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ВВОДА, ОБРАБОТКИ И ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

УДК 634.715.2 : 535.317.2 : 631.325.5

В. В. ВЕРТОПРАХОВ, С. В. МИХЛЯЕВ, Ю. В. ЧУГУЙ,
В. П. ЮНОШЕВ
(Новосибирск)

ОПТИКО-ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА ПРОМЫШЛЕННОГО КОНТРОЛЯ

Введение. Создание высокопроизводительных бесконтактных прецизионных средств контроля геометрических параметров изделий — одна из актуальных задач современного приборостроения. Считается, что наиболее перспективные из них — оптико-электронные [1]. Достижимые параметры этих систем по быстродействию, точности и диапазону измерения наиболее полно отвечают требованиям, предъявляемым к средствам контроля.

Известные автоматические оптико-электронные системы, как правило, позволяют контролировать изделия относительно простой формы (цилиндры, ступенчатые валики и т. п.) в одном или нескольких сечениях [1—4]. Вместе с тем потребности современного производства ставят задачу разработки средств контроля изделий более сложной формы, для характеристики которой требуется информация о геометрии изделий в десятках и даже сотнях его сечений.

Возможны два подхода при ее решении. Первый из них предусматривает создание узкоспециализированных средств, ориентированных на конкретные виды изделий. Предполагается, что разработка таких систем оправдана в случае массового производства изделий. В условиях же серийного производства при большой номенклатуре изделий более верным является создание перестраиваемых (квазиуниверсальных) средств контроля, допускающих быструю переналадку на аппаратном или программном уровне при изменении типа контролируемого изделия. Измерительная система в этом случае должна обеспечивать получение достаточно полной информации о конфигурации изделия, что достигается при использовании, например, цифровых телевизионных систем на основе видео-процессоров, интенсивно разрабатываемых в настоящее время [5]. Такие системы позволяют в реальном времени регистрировать и хранить информацию о контролируемом и эталонном объектах и производить над ними простейшие операции сравнения. Область применения этих систем из-за их невысокого разрешения ($N \times N = 512 \times 512$) ограничивается в основном контролем качественных характеристик изделий, а также измерением геометрии мелких объектов (1—2 мм), для которых погрешность $\delta = 1/N = 0,2\%$ оказывается допустимой.

На практике представляет интерес измерение параметров изделий в существенно большем диапазоне — до нескольких десятков миллиметров. Традиционные сканирующие методы в этом случае могут обеспечить требуемую точность измерения (погрешность в несколько микрометров, или $\sim 0,01\%$) лишь при использовании прецизионных считывающих систем высокого разрешения ($10^4 \times 10^4$ и более).

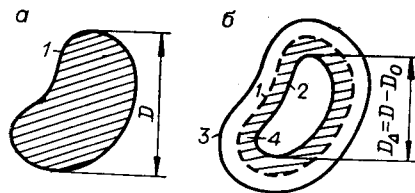


Рис. 1.

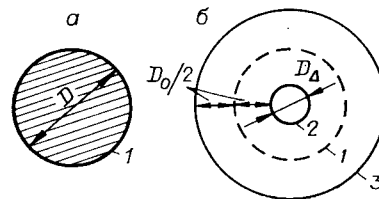


Рис. 2.

Вместе с тем при контроле изделий простой формы указанная точность достигается и в системах обычного разрешения ($\sim 500 \times 500$), но при организации дифференциального метода измерений [6].

В настоящей работе предложен дифференциальный метод контроля изделий сложной формы, имеющих четкую теневую проекцию, на основе средств фурье-оптики телевизионной и цифровой техники. Методы фурье-оптики используются при этом для преобразования контура теневого изображения контролируемого изделия, в результате чего расстояния между составляющими его элементами уменьшаются в десятки раз. Анализ геометрии преобразованного (дифференциального) изображения осуществляется электронными средствами. Перестройка измерительной системы при изменении типа контролируемого изделия может быть сведена в этом случае к замене оптического фильтра пространственных частот и программного обеспечения.

Ниже изложен принцип формирования дифференциальных изображений с помощью так называемых размерных преобразований, приведена структура разработанной на его основе оптико-цифровой системы промышленного контроля, обсуждаются результаты ее предварительных испытаний.

Сущность размерных преобразований. Как показано в [7], формирование дифференциального изображения может быть сведено к мультиплицированию исходного теневого изображения по определенному закону. Такая операция эффективно реализуется средствами фурье-оптики с использованием фильтров пространственных частот. Рассмотрим особенности таких преобразований на примере двумерного (радиально-симметричного) и одномерного расщепляющих фильтров [8, 9].

Действие первого фильтра, имеющего передаточную функцию

$$H(\omega) = \omega \sin(\omega D_0/2), \quad (1)$$

где $\omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}$ — пространственная частота, а D_0 — константа расщепления, при помещении его в частотную область оптической системы пространственной фильтрации [10] сводится к расщеплению контура I входного теневого изображения $f(x, y)$ (рис. 1, а) на два компонента: внутренний 2 и внешний 3 , отстоящие от исходного на одинаковом расстоянии $D_0/2$ (рис. 1, б). Можно видеть, что внутренний компонент выходного изображения $g(x, y)$ является контуром изображения, полученного в результате «вычитания» из изображения $f(x, y)$ области 4 (см. рис. 1, б), вследствие чего его характерный размер D_Δ по сравнению с исходным D уменьшается на величину D_0 , т. е. $D_\Delta = D - D_0$. Выполняемое при этом преобразование изображения $f(x, y)$ можно назвать размерным, а изображение $g_\Delta(x, y)$, представленное внутренним контуром 2 , — дифференциальным. Проиллюстрируем особенности размерного преобразования на примере различных объектов.

Для такого характерного объекта, как шар (рис. 2, а), дифференциальное изображение $g_\Delta(x, y)$ имеет вид окружности диаметром $D_\Delta = D - D_0$, где D — диаметр шара (рис. 2, б). Заметим, что при выборе $D_0 = D$ изображение сводится в точку дифракционного размера, а это означает, что при отклонении контролируемого размера от номинального

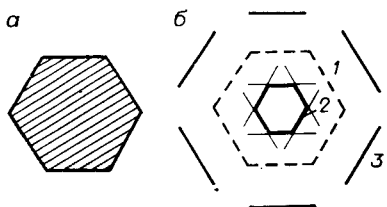


Рис. 3.

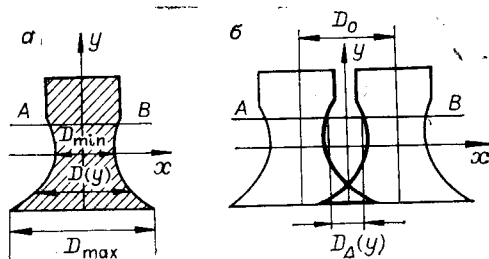


Рис. 4.

на величину ΔD эта точка преобразуется в окружность с тем же радиусом ΔD .

Другой пример — объект в виде многоугольника. На рис. 3 показано его теневое изображение (а) и результат фильтрации (б). Каждый отрезок контура 1 в этом случае расщепляется на два компонента 2, 3, однако из-за краевых эффектов, возникающих вследствие негладкости контура, внешние компоненты оказываются незамкнутыми, а внутренние — пересекающимися [8, 9].

Рассмотрим теперь случай одномерного расщепляющего фильтра, описываемого передаточной функцией

$$H(\omega_x) = \omega_x \sin(\omega_x D_0/2). \quad (2)$$

Такой фильтр из исходного изображения (рис. 4, а) формирует два оконтурированных изображения, смещенных относительно друг друга по оси x на величину D_0 (рис. 4, б). Размер дифференциального изображения в сечении AB при этом равен $D_\Delta(y) = D(y) - D_0$.

Для характеристики размерного преобразования можно ввести коэффициент размерного сжатия $\gamma = D/D_\Delta$, определяющий выигрыш по точности при использовании дифференциального метода измерений. Относительная погрешность измерения в этом случае $\delta = (\gamma N)^{-1}$, где N — число элементов разрешения телевизионной системы, укладываемых на измеряемом размере D_Δ , и при $N = 500$ и $\gamma = 20$ ее уровень может быть уменьшен до 0,01%. Так как в общем случае $D(y)$ (см. рис. 4) изменяется в некотором диапазоне $[D_{\min}, D_{\max}]$, то очевидно, что коэффициент размерного сжатия $\gamma = D(y)/(D(y) - D_0)$ для различных сечений объекта различен и зависит от D_0 . При выборе константы расщепления $D_0 = (D_{\max} + D_{\min})/2$ диапазон изменения дифференциального размера $D_\Delta(y)$ минимален: $|D_\Delta(y)| \leq (D_{\max} - D_{\min})/2$, поэтому коэффициент $\gamma \geq \gamma_0 = 2D_{\max}/(D_{\max} - D_{\min})$. В худшем случае при $D_{\max} \gg D_{\min}$ параметр γ_0 равен 2. Увеличение граничного значения γ_0 достигается при использовании фильтра в виде суперпозиции компонентов (2) с различными значениями констант расщепления D_0 [7].

Изложенный выше принцип формирования дифференциальных изображений с помощью размерных преобразований положен в основу разработанной нами оптико-цифровой системы контроля.

Структура оптико-цифровой системы контроля (ОЦСК). Система включает блоки оптической (БООИ) и электронной (БЭОИ) обработок информации, телевизионную (ТВ) камеру*, микро-ЭВМ и видеоконтрольное устройство (ВКУ) (рис. 5).

БООИ осуществляются размерные преобразования над теневым изображением изделия. Вид преобразования в общем случае определяется типом изделия и спецификой решаемой контрольно-измерительной задачи. При переходе от одного класса контролируемых объектов к другому переналадка оптического блока системы сводится к замене фильтра. Полученное на выходе этого блока дифференциальное изображение с со-

* Более подробная информация об этих блоках дана в статьях [7, 11], опубликованных в этом номере.

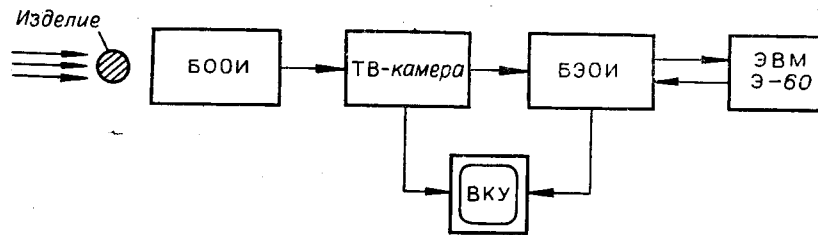


Рис. 5.

ответствующим увеличением проецируется на вход телекамеры, видеосигнал с которой обрабатывается далее в БЭОИ, выполняемом в стандарте КАМАК. По команде от ЭВМ БЭОИ преобразует видеосигнал, соответствующий определенной ТВ-строке, в бинарный вид. Затем осуществляется квантование и измерение интервалов времени начала ТВ-строки и переднего и заднего фронтов бинарного сигнала, относящихся к каждому из контуров дифференциального изображения в определенном его сечении. По полученным значениям в ЭВМ вычисляется пространственная координата x центра каждого контура (координата y при этом задается номером ТВ-строки).

Так как общее время выполнения программы вычисления координат контуров в ТВ-строке составляет несколько сот микросекунд, то это означает, что при использовании стандартного крейт-контроллера система может обрабатывать лишь каждую третью строку. Для повышения производительности системы нами использован крейт-контроллер с внутренней обработкой запросов [12], позволяющий осуществлять все операции по пересылке данных внутри крейта КАМАК, минуя ЭВМ, причем со скоростью в несколько микросекунд на одну координату контура. В этом случае в течение времени развертки строки (64 мкс) производится несколько измерений, и таким образом открывается возможность считывания координат всех точек дифференциального (контурного) изображения за один ТВ-кадр (40 мс).

Видеоконтрольное устройство отображает информацию, полученную с телекамеры, а также различные служебные сигналы, что позволяет визуально контролировать работу ОЦСК.

Система имеет два режима работы: калибровочный и измерительный.

В режиме калибровки определяются основные параметры системы: константы расщепления, цена деления (мкм/квант). Кроме того, в этом режиме в ОЦСК вводятся параметры эталонного изделия, используемые при контроле методом сравнения. Это может быть реализовано на оптическом уровне (посредством считывания дифференциального изображения эталонного изделия) или на программном. В последнем случае характерные точки и допуски задаются в виде таблицы констант.

В измерительном режиме система регистрирует дифференциальное изображение контролируемого изделия, анализирует его, определяет требуемые геометрические параметры и принимает решение о годности изделия. Вычисление геометрических параметров объектов осуществляется с помощью набора программных модулей, выполняющих следующие операции:

1. Измерение линейных размеров (разовые измерения и измерения с усреднением в пространстве и времени).
2. Измерение параметров наружных резьб (средний диаметр, шаг, угол профиля).

Следует отметить, что возможность пополнения библиотеки программных модулей придает ОЦСК элементы универсальности.

Результаты предварительных испытаний ОЦСК. Основная цель испытаний состояла в определении метрологических характеристик разработанной системы, в выяснении требований к точности позиционирова-

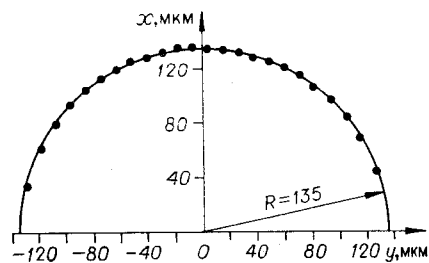


Рис. 6.

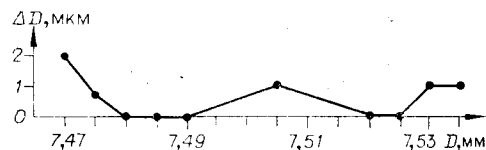


Рис. 7.

ния контролируемого изделия и точности юстировки пространственно-частотного фильтра.

Оптический блок ОЦСК был выполнен на базе системы пространственной фильтрации с одним объективом от проектора БП (фокусное расстояние 200 мм, апертура 55 мм) [7]. Пространственно-частотный фильтр имел апертуру 5×5 мм и состоял из бинарного оконтуривающего компонента и сменных одномерных дифракционных решеток различного периода (расщепляющий компонент). Источником излучения служил He—Ne-лазер. Регистрация изображений осуществлялась телекамерой КТП-87. В качестве микро-ЭВМ использовалась «Электроника-60». Следует отметить, что около 80% КАМАК-модулей, входящих в состав БЗОИ, были стандартными.

БООИ системы при испытаниях обеспечивал формирование дифференциального изображения с 3^{\times} увеличением. В результате цена деления (квант) ОЦСК при измерениях вдоль осей x и y составила 4 и 10 мкм. При этом нестабильность измерений с учетом как электронных, так и оптических шумов не превышала соответственно ± 2 и ± 1 кванта.

Точностные возможности системы в отсутствие расщепляющего фильтра (режим проецирования с увеличением) иллюстрируются на рис. 6, где приведены результаты измерения координат контура круглого отверстия диаметром 0,27 мм. Как следует из графика, погрешность воспроизведения формы (показана половина окружности) лежит в указанных выше пределах.

На рис. 7 представлены результаты измерения диаметров 10 тестовых цилиндрических изделий. Для снижения влияния шероховатости изделия измерения усреднялись по 30 сечениям изображения (на базе 0,3 мм). Из графика видно, что погрешность измерения ΔD в режиме усреднения не превышает 2 мкм.

На следующих графиках приведены экспериментальные результаты, иллюстрирующие зависимость погрешности измерения ΔD от неточности позиционирования изделия и расщепляющего фильтра.

На рис. 8 показана зависимость погрешности измерения от смещения контролируемого изделия по оси x . Видно, что при смещении его в пределах рабочего поля (7,5 мм в плоскости телекамеры или 2,5 мм на входе системы) ΔD не превышает 10 мкм. Эта погрешность обусловлена aberrациями оптики и нелинейностью развертки телекамеры и может быть учтена программным путем.

График на рис. 9 (прямая I) показывает зависимость погрешности измерения от величины расфокусировки изображения цилиндрического изделия (смещения его (Δz) вдоль оптической оси системы). Видно, что ОЦСК предъявляет достаточно низкие требования к точности позиционирования изделия: смещение его на 0,5 мм вызывает погрешность измерения не более 2 мкм. Здесь же приведена зависимость погрешности измерения ΔD от смещения фильтра вдоль оси системы (прямая II). Ее поведение в большей степени зависит от параметра Δz (смещение фильтра на 0,25 мм приводит к увеличению погрешности на 5 мкм).

Что касается зависимости погрешности ΔD от смещения фильтра перпендикулярно оптической оси, то, как показали эксперименты, сме-

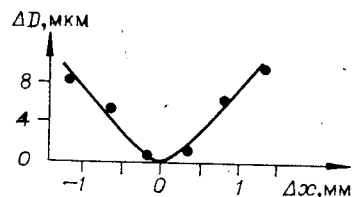


Рис. 8.

чение его на $\pm 0,1$ мм практически не влияет на результат измерения. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в ОЦСК к точности позиционирования контролируемого объекта и фильтра предъявляются более низкие требования по сравнению с известными когерентно-оптическими системами контроля [2, 4, 13].

Закключение. Контроль геометрических параметров изделий сложной формы прямыми (сканирующими) методами требует создания прецизионных высокоразрешающих измерительных систем ($10^4 \times 10^4$ и более). Альтернативный путь — реализация дифференциального метода измерений. Для этих целей перспективно применение средств фурье-оптики и цифровой телевизионной техники обычного разрешения (500×500). В этом случае теневое изображение объекта подвергается размерному преобразованию и далее обрабатывается электронными средствами.

Разработана квазиуниверсальная (перестраиваемая) оптико-цифровая система контроля. Ее оптический блок выполнен на основе системы пространственной фильтрации, а электронный — на базе модулей КАМАК с использованием микро-ЭВМ «Электроника-60». Применение стандарта КАМАК оказалось достаточно эффективным: большую часть электронного оборудования ($\sim 80\%$) удалось реализовать на основе стандартных модулей. Квазиуниверсальность системы обеспечивается тем, что при смене типа контролируемого изделия ее переналадка сводится к замене оптического фильтра пространственных частот и программного обеспечения.

Разработанная система позволяет контролировать широкий класс изделий, имеющих четкую теневую проекцию, в диапазоне до 40 мм с погрешностью $2 \div 10$ мкм. При этом за время одного ТВ-кадра (40 мс) в систему вводится информация о размерах изделия в 500 сечениях. Время ее обработки с целью определения требуемых геометрических параметров определяется решаемой задачей и характеристиками применяемых при этом технических средств.

Авторы признательны И. С. Солдатенкову за изготовление пространственно-частотных фильтров, а также Б. Е. Кривенкову за полезные замечания, высказанные им при чтении рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schaffer G. A new look at inspection.— American Machinist, 1979, vol. 123, N 8, p. 104—126.
2. Indebetouw G., Tschudi T., Herziger G. Quality control of small mechanical pieces using optical correlation techniques.— Appl. Opt., 1976, vol. 15, N 2, p. 516—522.
3. Бычков Р. М., Коронкевич В. П., Соловьев Н. Г., Чугуй Ю. В. Измерение параметров резьбовых изделий по пространственному спектру.— В кн.: Тез. докл. III Всесоюз. конф. по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1978.
4. Бычков Р. М. и др. Оптико-электронная система для контроля размеров деталей сложной формы.— Новосибирск, 1980. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИАиЭ СО АН СССР; № 109).
5. Menger P. Digital video systems applied to product inspection.— In: SPIE. Optics in Quality Assurance II, 1979, vol. 170.
6. Полоник В. С. Телевизионные автоматические устройства.— М.: Связь, 1974.
7. Вертопрахов В. В., Михляев С. В., Чугуй Ю. В. Оптическое преобразование изо-

- бражений в оптико-цифровой системе промышленного контроля.— *Автометрия*, 1983, № 4.
8. Михляев С. В., Чугуй Ю. В. Оперативное формирование полей допусков при контроле формы изделий.— *Автометрия*, 1979, № 1.
 9. Mikhlyayev S. V., Chugui Yu. V., Soldatenkov I. S., Gurtova T. V. Producing of tolerance gaps by spatial filtering.— *Optica Applicata*, 1981, vol. XX, N 1, p. 169—182.
 10. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику.— М.: Мир, 1970.
 11. Богомолов Е. Н., Дикун А. Е., Юношев В. П. Аппаратные и программные средства оптико-цифровой системы контроля.— *Автометрия*, 1983, № 4.
 12. Солобоев В. Е., Солоненко В. И. Контроллер КАМАК к ЭВМ «Электроника-60» с внутренней обработкой запросов.— *Автометрия*, 1980, № 4.
 13. Соловьев Н. Г. Дифракционный коррелятор для допускового контроля размеров с инверсной выходной характеристикой.— *Автометрия*, 1981, № 1.

Поступила в редакцию 29 марта 1983 г.

УДК 531.715.2 : 535.317.2 : 631.325.5

В. В. ВЕРТОПРАХОВ, С. В. МИХЛЯЕВ, Ю. В. ЧУГУЙ

(Новосибирск)

ОПТИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИКО-ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЕ ПРОМЫШЛЕННОГО КОНТРОЛЯ

В работе [1] приведено описание общей структуры и принципа работы оптико-цифровой системы бесконтактного многомерного контроля (ОЦСК) геометрических параметров промышленных изделий. В состав ОЦСК входят блоки оптической и электронной обработок информации, телевизионная камера и микро-ЭВМ. В настоящем сообщении рассматривается блок оптической обработки информации (БООИ), выполняющий в ОЦСК функции аналогового устройства предварительной обработки изображений контролируемых изделий.

В известных телевизионных измерительных системах на вход телекамеры (многоэлементного фотоприемника) подается, как правило, теневое изображение объекта, сформированное в проходящем или отраженном свете [2, 3].

Такие системы используются в основном для многомерного контроля мелких изделий, например в часовой промышленности. Увеличение габаритов изделий приводит к существенному снижению точности контроля или увеличению времени анализа и усложнению конструкции механической части системы, поскольку в этом случае приходится либо уменьшать изображение, с тем чтобы разместить его в приемном поле телекамеры, либо производить его последовательную обработку по фрагментам. Повышение точности контроля в таких системах достигается при дифференциальном методе измерения с помощью нескольких телевизионных камер или проекционных оптических систем, формирующих двойное изображение изделия [2].

Многокамерные системы применяются в основном для контроля крупногабаритных объектов, характерные размеры которых составляют десятки сантиметров. Системы с двойным изображением используются, в свою очередь, при контроле наиболее массовой продукции с меньшими размерами. Серьезный недостаток систем с двойным изображением, препятствующий их широкому распространению, связан с одномерным характером осуществляемого в них преобразования. Это обстоятельство во многих случаях не исключает необходимости последовательного анализа изображения по фрагментам и тем самым существенно ограничивает