
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 531.716; 681.7
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-8-720-726

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ С УГЛОВЫМ ЗЕРКАЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

А. А. Кульчицкий¹, А. И. Потапов¹, А. Г. Смирнов¹, В. И. Бойков²

*Санкт-Петербургский горный университет, 119106, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: doz-ku@rambler.ru*

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

Рассматривается оптическая система контроля формы и дефектов геометрии осесимметричных изделий с использованием одной цифровой камеры, обосновано применение углового зеркального преобразователя для получения возможности полного обзора поверхности объекта в зоне контроля. Отмечены достоинства и недостатки предложенной компоновки и определена область применения. Представлена схема и расчетные соотношения параметров системы контроля и приведены рекомендации по их выбору.

Ключевые слова: *оптический контроль, контроль осесимметричных изделий, контроль дефектов изделий, контроль формы, измерение линейных размеров*

Качество осесимметричных изделий определяется соответствием их размеров и формы заданным параметрам. Так, например, основными параметрами для контроля проволоки [1], а также состояния канатов грузоподъемных механизмов являются диаметр и овальность. Непрерывный контроль таких изделий не позволяет использовать контактные методы.

Основными методами контроля являются магнитный и (или) оптический [2, 3]. Более сложным вариантом контроля может считаться задача определения геометрии деталей типа тела вращения в машиностроительной отрасли или элементов технологического оборудования в других отраслях, например, контроль токоподводящих стержней электролизеров в металлургической промышленности. В процессе эксплуатации они подвергаются сильному температурному и механическому воздействиям, вследствие чего изменяется их форма и геометрия рабочей части. Использование магнитных методов для подобных изделий невозможно вследствие требуемых больших рабочих расстояний.

Способы контроля формы и размеров изделий оптическими средствами могут быть реализованы проекционными системами и 3D пассивными или активными системами [4]. Применение пассивных стереоскопических 3D-систем не позволяет обеспечить высокую точность без применения маркеров, что усложняет процедуру контроля, повышает ее стоимость и делает непригодной для поточного контроля. Системы 3D-контроля активного типа (со структурированной подсветкой) позволяют обеспечить более высокую точность, однако из-за ограниченного угла зрения невозможно выявлять дефекты на всей поверхности, что требует использования дополнительных механических приспособлений для поворота контролируемого изделия [5].

При использовании оптического проекционного способа определения геометрии изделий [6] информация о размерах считывается непосредственно с изображения, получаемого цифровой камерой, при нефиксированном положении контролируемого объекта. Компенсировать погрешности смещения объекта относительно регистрирующего устройства (цифровой камеры) возможно посредством нескольких компоновочных решений [7]. Проанализируем некоторые из них.

Система с использованием двух цифровых камер, размещенных под углом 90° , позволяет получить изображение осесимметричного тела в двух взаимно перпендикулярных сечениях, что дает возможность определить его форму и основные размеры. Однако такая система не приспособлена для контроля состояния поверхности, поскольку больше четверти площади объекта (для цифровых камер с нетелецентрическими объективами [8]) находится вне поля зрения. Достоинством данной компоновки является простая реализация компенсации смещения объекта (как линейного, так и углового) в пределах поля зрения.

Система с использованием трех цифровых камер, размещенных под углом 120° , позволяет производить контроль дефектов всей поверхности изделия (с перекрытием) и обеспечивает максимальную точность контроля. Однако такое расположение камер затрудняет обслуживание установки контроля, система получается в полтора раза более дорогостоящей, а алгоритмы более сложными.

Возможный путь упрощения структуры измерительной системы — использование отражающих оптических элементов, формирующих дополнительные изображения, регистрация которых позволяет при использовании одной камеры контролировать всю поверхность объекта.

Для решения этой проблемы — упрощения структуры видеосистемы контроля осесимметричных изделий — предлагается использовать оптические зеркальные преобразователи с плоскими зеркалами. Система с использованием одной камеры и углового зеркального преобразователя (УЗП) представлена на рис. 1, а. Для обеспечения наибольшей зоны перекрытия изображений выберем угол установки зеркал равным 120° . Зеркала располагаются симметрично относительно оптической оси.

Достоинствами предлагаемой системы с УЗП являются возможность получения изображения всей поверхности объекта контроля с помощью системы зеркал, установленных напротив камеры; возможность определения положения объекта в контролируемой области и соответственно реализация алгоритмов компенсации его смещения относительно плоскостей калибровки, а также уменьшение стоимости системы (по сравнению с системой с тремя камерами) за счет установки только одной камеры. Наряду с этим предлагаемая система имеет и недостатки, такие как размытость вторичных (отраженных в зеркале) изображений контролируемого объекта (рис. 1, б) при фокусировке на центральном изображении и уменьшение разрешения изображения в 3 раза (пропорционально их количеству).

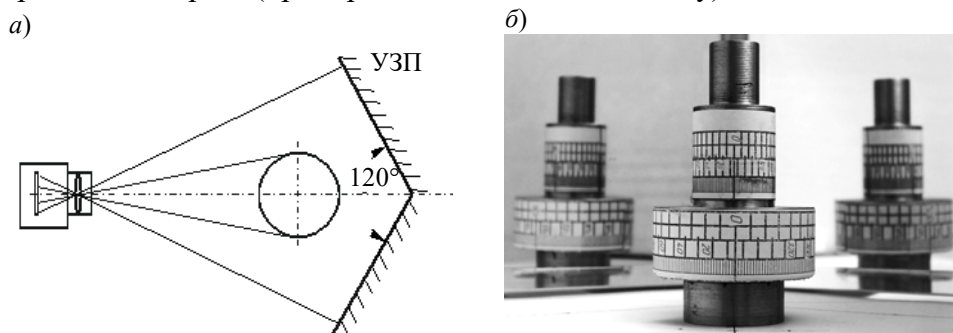


Рис. 1

Совокупность достоинств и недостатков предложенной системы определяет область ее возможных применений, где основной задачей является контроль формы осесимметричного

изделия и дефектов его поверхности, например контроль состояния грузоподъемных канатов или токоподводящих стержней, когда требования к точности определения размеров сравнительно не высоки.

Рассмотрим расчетную схему системы с УЗП (рис. 2), полагая оптическую систему идеальной [9], а положение объекта контроля фиксированным, при этом ось его симметрии пересекает оптическую ось и перпендикулярна ей. Для простоты на рисунке представлено только одно вторичное (зеркальное) изображение, поскольку закономерности формирования второго изображения полностью идентичны.

По крайним наблюдаемым точкам M_1 — M_4 изделия определяются его размеры. При этом изображения в сечении M_1M_2 регистрируются камерой непосредственно, а в сечении M_3M_4 — через зеркало PP_1 , образуя вторичные отображения M'_3 и M'_4 . Для камеры с нетелецентрическим объективом регистрируемый размер d в сечении M_1M_2 смещен вдоль оптической оси относительно оси вращения детали [9].

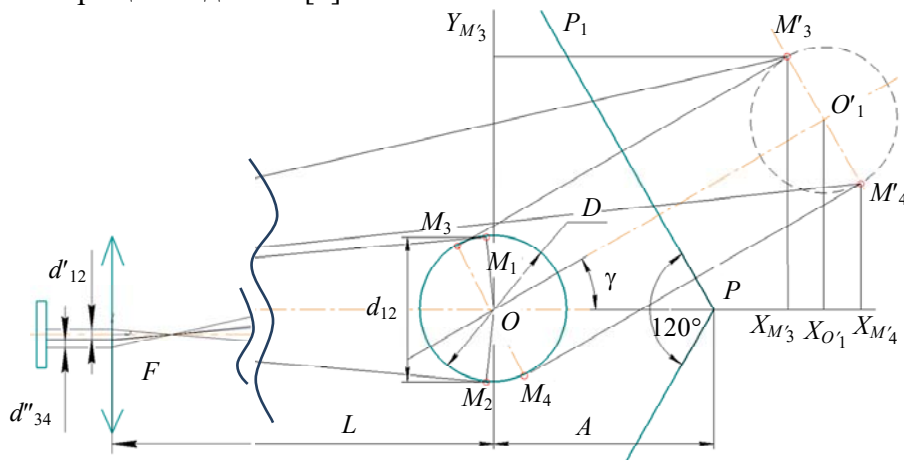


Рис. 2

Расстояние между осью объекта контроля и ребром углового зеркала обозначим как A . Для максимального использования возможностей регистрирующей цифровой камеры, которые достигаются за счет минимизации расстояний между изображениями (первым $M'_1 M'_2 = d'_{12}$ и вторичным $M''_3 M''_4 = d''_{34}$), рекомендуется выбирать соотношение $A=(1,5...2)D_{\max}$, где D_{\max} — максимальный контролируемый размер осесимметричного изделия. При меньшем значении A возможно слияние изображений, при большем снижается действительное разрешение контролируемого изображения. При незафиксированном положении объекта контроля для упрощения алгоритмов обработки изображения при определении величин смещения данное соотношение должно быть увеличено.

Известно, что одиночное зеркало PP_1 отображает точку M_3 в точку M'_3 по известному закону: отображение M'_3 расположено на перпендикуляре к поверхности зеркала, проходящем через предметную точку M_3 , и удалено от нее на двойное расстояние между предметной точкой и плоскостью зеркала, т. е. точка M_3 и ее отображение M'_3 расположены симметрично относительно плоскости PP_1 на одной прямой.

Определив расстояние между центрами объекта контроля и его изображения в зеркале PP_1

$$OO'_1 = 2A \cos \gamma,$$

можно вычислить координаты отображений M'_3 и M'_4 в системе координат, начало которой располагается в точке O , а ось x совпадает с оптической осью:

$$X_{M'_3} = 2A \cdot \cos^2 \gamma - D_{34} / 2 \cdot \sin \gamma, \quad Y_{M'_3} = 2A \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma + D_{34} / 2 \cdot \cos \gamma;$$

$$X_{M'_4} = 2A \cdot \cos^2 \gamma + D_{34} / 2 \cdot \sin \gamma, \quad Y_{M'_4} = 2A \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma - D_{34} / 2 \cdot \cos \gamma,$$

где D_{34} — размер объекта в сечении M_3M_4 , угол γ дополняет до прямого половину угла между зеркалами УЗП.

На рис. 2 координата $Y_{M'_4}$ не обозначена, чтобы не перегружать схему. Значение $Y_{M'_3}$ используется для габаритного расчета оптической системы контроля при фиксированном положении объекта. Зависимости для $Y_{M'_3}$, $Y_{M'_4}$, выведенные для верхнего отражения, будут соблюдаться и для нижнего (не показанного) изображения, но со сменой знаков.

Размер d''_{34} вторичного изображения в плоскости регистрации камеры можно вычислить по формуле

$$d''_{34} = f \left(\frac{Y_{M'_3}}{L - f + X_{M'_3}} - \frac{Y_{M'_4}}{L - f + X_{M'_4}} \right),$$

где f — фокусное расстояние объектива.

Соответственно размер d'_{12} изображения определяется на основании [9] как

$$d'_{12} = \frac{f}{L - f - \frac{D_{12}^2}{4(L - f)}} D_{12} \sqrt{1 - \left(\frac{D_{12}}{2(L - f)} \right)^2}.$$

Соотношение размеров d' и d''_1 при выбранном угле между зеркалами $2\alpha=120^\circ$ зависит от величин L , A , D , f и для рассмотренного примера, при $L=290$ мм, $A=75$ мм, $D=50$ мм, $f=12$ мм, соотношение $d' / d''_1 = 1,484$.

Для учета особенностей реальной оптической системы необходимо проводить процедуру ее калибровки с использованием тест-объекта для каждого изображения отдельно. Особенностью калибровки вторичных отображений является необходимость использования тест-объектов, размеры которых не должны превышать $1,2 \dots 1,5 D_{\max}$ (чтобы избежать перекрытия изображений). Если задать относительную точность процедуры калибровки в 1 пкс (что составит 0,05 % для цифровой камеры с разрешением 5 Мпкс), допустимыми будут угловые отклонения тест-объекта до $\pm 1^\circ$ в плоскости, проходящей через ось симметрии объекта контроля [7].

При определении размеров тела вращения по центральному изображению для выбранного объектива с $f=12$ мм будет присутствовать проекционная ошибка [8]. Для рассмотренной системы контроля она равна 0,2 мм или 0,4 %.

Рассмотрим методику определения положения объекта контроля при его смещении относительно принятого исходного, т.е. когда ось его симметрии находится на пересечении оптической оси с плоскостью калибровки центрального изображения (точка O). Оценить величину смещения объекта контроля на Δy из точки O в точку $O_{\Delta y}$ (рис. 3, а) можно по смещению центрального изображения (исходное положение определяется при выполнении процедуры калибровки). При таком смещении объекта контроля размер центрального изображения существенно изменяется только в том случае, когда для регистрации применяется цифровая камера с короткофокусным объективом. Ее использование приводит к появлению проекционной ошибки [9], что скажется на точности определения размеров по центральному изображению. Размер вторичного изображения будет изменяться, поскольку изменяется положение точек $M_{3\Delta y}$ и $M_{4\Delta y}$ (не обозначена на рис. 3, а) относительно плоскости зеркал PP_1 . Для рассмотренного примера при смещении $\Delta y=5$ мм изображение в зеркале увеличится на 1,49 %.

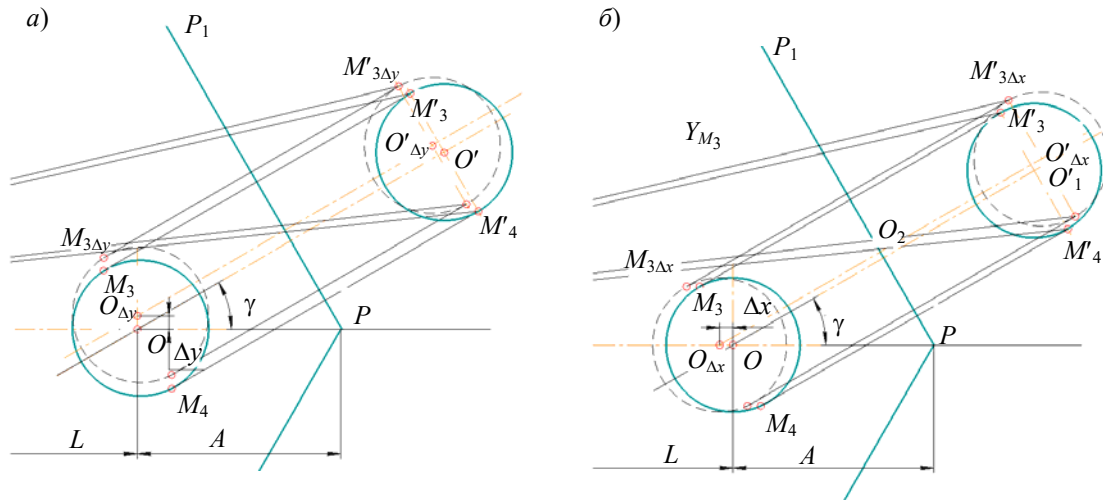


Рис. 3

Смещение объекта контроля вдоль оптической оси на Δx из точки O в точку $O_{\Delta x}$ (см. рис. 3, б) влияет на изменение размеров как центрального изображения (d'_{12} увеличивается на 5,77 % при $\Delta x = 0,05$ от L), так и вторичных (зеркальных) изображений (d''_{34} уменьшается на 0,34 % при аналогичном смещении), что приводит к значительным ошибкам при определении размеров осесимметричного тела по постоянным калибровочным коэффициентам. Для компенсации данной ошибки [7] (в пределах до $\pm 5\%$, где изменения калибровочных зависимостей можно принять линейными) нужно определить отклонение объекта контроля от плоскости калибровки. Для рассматриваемой схемы это можно реализовать двумя способами: по соотношению размеров первичного и вторичных изображений (при смещении Δx соотношение d'_{12} / d''_{34} изменится на 6,13 %) и по положению вторичных изображений относительно первичного (при смещении Δx вторичные изображения будут смещаться к краям). Реализация последнего способа представляется более простой. Тогда на стадии индивидуальной градуировки (калибровки) системы контроля необходимо определить положение центров объекта контроля на всех изображениях в плоскости калибровки.

Выполненные исследования подтверждают возможность реализации системы контроля геометрии осесимметричных изделий с использованием одной цифровой камеры и УЗП из двух плоских зеркал для оценки состояния всей поверхности, определения основных формообразующих размеров и отклонений от заданной формы вдоль оси симметрии. Предложенная компоновка позволяет контролировать геометрические параметры изделий, находящихся как в фиксированном положении, так и при их смещениях в пределах до $\pm 5\%$ относительно плоскости калибровки, с погрешностью до 0,5 % (при условии компенсации отклонений от плоскости калибровки). В то же время при нефиксированном положении осесимметричных объектов задача контроля их формы (например, овальности) в плоскости, перпендикулярной оси симметрии, становится труднореализуемой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сухоруков В. В., Котельников В. С. Мониторинг состояния стальных канатов автоматизированными средствами технического диагностирования // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 9. С. 72—81.
2. Федоров Е. М., Гольдштейн А. Е., Редько В. В. Методы и приборы оптического контроля диаметра и овальности электрических кабелей в процессе их производства // Ползуновский вестник. 2010. № 2. С. 141—148.
3. Зародов И. С., Ершов Е. В. Оптико-электронный контроль оцинкованной проволоки // Технические науки. 2013. № 1. С. 23—25.

4. Гужов В. И. Методы измерения 3D-профиля объектов. Контактные, триангуляционные системы и методы структурированного освещения: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. 82 с.
5. Song Zhang. High-resolution, Real-time 3-D Shape Measurement: Diss. Abstract ... Dr. Sci. Stony Brook Univ., N. Y. 2005.
6. Potapov A. I., Makhov V. E. et al. Smart-camera — based linear sizing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. Vol. 55, N 7. P. 524—532.
7. Потапов А. И., Кульчицкий А. А., Смородинский Я. Г., Смирнов А. Г. Оценка погрешности системы контроля геометрии токоподводящих стержней для электролизеров с самообжигающимся анодом // Дефектоскопия. 2020. № 3. С. 58—64.
8. Kulchitskiy A. A., Fedorova E. R. Optical inspection of solids of revolution by means of nontelecentric optics // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Nov., 378: 012062. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012062.
9. Сарвин А. А., Кульчицкий А. А., Наумова А. К. Оптические методы бесконтактных измерений линейных перемещений. СПб: Изд-во СЗТУ, 2011. 195 с.

Сведения об авторах

- Александр Александрович Кульчицкий** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский горный университет, кафедра автоматизации технологических процессов и производств; E-mail: doz-ku@rambler.ru
- Анатолий Иванович Потапов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский горный университет, кафедра приборостроения; E-mail: apot@mail.ru
- Андрей Геннадиевич Смирнов** — Санкт-Петербургский горный университет, кафедра автоматизации технологических процессов и производств; заведующий лабораторией; E-mail: sztu1522@gmail.com
- Владимир Иванович Бойков** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра систем управления и робототехники; E-mail: viboikov@mail.ru

Поступила в редакцию
26.05.2020 г.

Ссылка для цитирования: Кульчицкий А. А., Потапов А. И., Смирнов А. Г., Бойков В. И. Система контроля геометрии осесимметричных изделий с угловым зеркальным преобразователем // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 8. С. 720—726.

GEOMETRY CONTROL SYSTEM FOR AXISYMMETRIC PRODUCTS WITH ANGLE MIRROR CONVERTER

A. A. Kulchitsky¹, A. I. Potapov¹, A. G. Smirnov¹, V. I. Boykov²

Saint-Petersburg Mining University, 119106, St. Petersburg, Russia
E-mail: doz-ku@rambler.ru

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

An optical system for controlling the shape and geometry defects of axisymmetric products using one digital camera is considered. To obtain the possibility of a complete view of the object surface in the control zone, an angular mirror converter is used. The advantages and disadvantages of the proposed layout are discussed, and the area of its application is determined. The diagram and the calculated ratios of the control system parameters are presented, and recommendations for their choice are given.

Keywords: optical control, control of axisymmetric products, control of product defects, shape control, measurement of linear dimensions

REFERENCES

1. Sukhorukov V.V., Kotel'nikov V.S. *Occupational Safety in Industry*, 2019, no. 9, pp. 72–81.
2. Fodorov E.M., Gol'dshteyn A.E., Red'ko V.V. *Polzunovsky vestnik*, 2010, no. 2, pp. 141–148. (in Russ.)
3. Zarodov I.S., Ershov E.V. *Cherepovets State University Bulletin*, 2013, no. 1, pp. 23–25. (in Russ.)
4. Guzhov V.I. *Metody izmereniya 3D-profilya ob'yektov. Kontaktnyye, triangulyatsionnyye sistemy i metody strukturirovannogo osveshcheniya* (Methods for Measuring the 3D Profile of Objects. Contact, Triangulation Systems and Structured Lighting Methods), Novosibirsk, 2015, 82 p. (in Russ.)

5. Song Zhang. *High-resolution, Real-time 3-D Shape Measurement*, Abstract of the Dissertation, Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, Stony Brook University, 2005, 127 p.
6. Potapov A.I., Makhov V.E. et al. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, no. 7(55), pp. 524–532.
7. Potapov A.I., Kulchitskii A.A., Smorodinskiy Ja.G., Smirnov A.G. *Defektoskopiya*, 2020, no. 3, pp. 58–64. (in Russ.)
8. Kulchitskiy A.A., Fedorova E.R. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, Vol. 378, pp. 012062.
9. Sarvin A.A., Kulchitskiy A.A., Naumova A.K. *Opticheskiye metody beskontaktnykh izmereniy lineynykh peremeshcheniy* (Optical Methods for Non-contact Measurements of Linear Displacements), St. Petersburg, 2011, 195 p. (in Russ.)

Data on authors

- Alexander A. Kulchitsky** — PhD, Associate Professor; Saint-Petersburg Mining University, Department of Automation of Technological Processes and Productions; E-mail: doz-ku@rambler.ru
- Anatoly I. Potapov** — Dr. Sci., Professor; Saint-Petersburg Mining University, Department of Instrument Engineering; E-mail: apot@mail.ru
- Andrey G. Smirnov** — Saint-Petersburg Mining University, Department of Automation of Technological Processes and Productions; Head of the Laboratory; E-mail: sztu1522@gmail.com
- Vladimir I. Boykov** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: viboikov@mail.ru

For citation: Kulchitsky A. A., Potapov A. I., Smirnov A. G., Boykov V. I. Geometry control system for axisymmetric products with angle mirror converter. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 8. P. 720—726 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-8-720-726