

УДК 62-791.2 535.8

Миниатюрный стереоскопический объектив для измерения геометрических параметров труднодоступных технических объектов

© 2019 г. **В. И. БАТШЕВ***, **, ***, КАНД. ТЕХН. НАУК;
А. С. МАЧИХИН*, **, КАНД. ФИЗ.-МАТ. НАУК; **А. В. ГОРЕВОЙ***, **;
Д. Д. ХОХЛОВ*, **, АСПИРАНТ; **А. А. НАУМОВ***, **, СТУДЕНТ

*Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва;

**Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва;

***Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва

E-mail: batshev_vlad@mail.ru

Поступила в редакцию 14.02.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2018-86-06-45-49

Рассмотрена задача бесконтактного измерения геометрических параметров труднодоступных объектов. Разработана оптическая система компактного призмочно-линзового объектива для одновременного формирования изображений наблюдаемого объекта с двух ракурсов на одном матричном приёмнике излучения. Изготовлен макет рассчитанной системы. Экспериментальные исследования подтверждают, что разработанная оптическая система обеспечивает высокое качество изображений. Их цифровая обработка позволяет осуществлять восстановление формы исследуемой поверхности стереоскопическим методом и проводить измерение геометрических параметров с высокой точностью. Результаты работы могут найти применение в задачах машинного зрения, неразрушающего контроля и в других приложениях.

Ключевые слова: стереоскопический объектив, геометрические измерения, неразрушающий контроль, машинное зрение.

Коды OCIS: 080.3620, 110.6880, 150.3040, 150.6910.

ВВЕДЕНИЕ

Системы машинного зрения для контроля труднодоступных объектов широко используются на этапах производства, сборки и испытаний различных изделий в промышленности и медицине [1–3]. С их помощью анализируют внешний вид объекта и контролируют его геометрические параметры. Для этого оптическую систему (ОС) и матричный приёмник излучения устанавливают на дистальном конце видеоэндоскопического зонда [4–6]. Стереоскопический метод измерения трёхмерных координат является наиболее распространённым, поскольку при минимальных габаритах зонда позволяет проводить измерения для всех точек на изображении и не требует дополнительной системы подсветки. Из-за малого диаметра зондов (как правило, 4–8 мм) вместо двух отдельных объективов и приёмников излучения используются призмочно-линзовые ОС, позволя-

ющие получить изображения с двух ракурсов на одном приёмнике излучения (стереоизображение) [7–12]. Точность измерения существующих миниатюрных стереоскопических систем машинного зрения ограничена главным образом низким разрешением стереоизображения (как правило, не более 640×480 пикселей при диаметре зонда 6 мм) и возможностями применяемых алгоритмов цифровой обработки данных. Качество изображения определяет точность определения координат сопряжённых точек, а оптимальный выбор математической модели системы и алгоритмов обработки обеспечивают правильное и полное описание процесса формирования изображения.

Разработка устройства для стереоскопических измерений труднодоступных объектов, позволяющего повысить точность измерения геометрических параметров, является актуальной научно-технической задачей.

ТРЕБОВАНИЯ К ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Разработка ОС стереоскопического объектива для видеоэндоскопа осложнена, в первую очередь, ограниченными возможностями производства миниатюрных деталей. Поэтому в разработанной ОС не используются асферические и градиентные элементы и сложные, с точки зрения обработки, материалы. Кроме того, не существует стандартных методик абберационного расчёта и синтеза ОС подобного класса, то есть содержащих как осесимметричные детали, так и призму, не обладающую осевой симметрией.

К обрабатываемой ОС видеоэндоскопа выдвигаются следующие основные требования.

1. Для обеспечения универсальности разрабатываемого оборудования и для расширения круга решаемых им задач необходима возможность формирования как стереоизображения, так и одиночного изображения, занимающего весь матричный приёмник излучения. Для этого часть ОС, содержащая призму, должна быть сменной.

2. Для обеспечения установки объектива в видеоэндоскопический зонд диаметром 6 мм диаметры линз не должны превышать 2,5 мм.

3. Исходя из размеров объектов, подлежащих контролю, поле зрения ω должно быть не менее 40° .

4. Для обеспечения высокой точности измерения и удобства практического использования глубина резко изображаемого пространства (ГРИП), представляющая собой диапазон расстояний s от объектива до объекта наблюдения, в пределах которого обеспечивается высокое качество изображения объекта, должна быть не менее 35 мм. При этом ближняя граница диапазона должна быть не дальше 5 мм, а дальняя — не ближе 40 мм.

5. Для обеспечения приемлемой разрешающей способности 30 лин/мм размер формируемого стереосистемой пятна рассеяния должен быть равен 2–3 размерам пиксела приёмника излучения, однако из-за большой ГРИП и, как следствие, невысокой апертуры это практически недостижимо. Предельно допустимым для такого класса приборов можно считать пятно рассеяния порядка 15–20 мкм, что составляет около 10 размеров пиксела. Для этого и для обеспечения приемлемой освещённости изображения относительное отверстие объектива должно быть не менее 1:10.

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОГО ОБЪЕКТИВА

Первые три требования определили компоновку ОС стереоскопического объектива в виде, представленном на рис. 1.

Стереобъектив состоит из двух блоков: сменной стереоскопической насадки I и базового (встроенного в зонд) объектива II. Излучение от объекта 1 делится призмой 2 на два пучка, один из

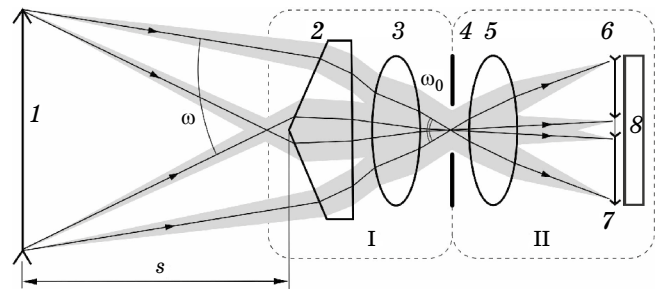


Рис. 1. Оптическая схема стереоскопического объектива.

которых проходит через верхнюю грань призмы, другой — через нижнюю. Последующая ОС, состоящая из компенсатора 3 и объектива 5, формирует два изображения 6 и 7 объекта 1 на приёмнике излучения 8. Для обеспечения минимальных световых размеров компонентов апертурная диафрагма 4 располагается между объективом 5 и компенсатором 3, а поле зрения объектива ω_0 невелико, оно составляет 30° . В качестве приёмника излучения использована КМОП-матрица с диагональю $1/6''$ и разрешением 1920×1080 пикселей. Размер пиксела составляет $1,4 \times 1,4$ мкм².

Для обеспечения ГРИП в пределах $s = 5\text{--}40$ мм и относительного отверстия не ниже 1:10 компенсатор 3 сделан двухкомпонентным, причём первый компонент — отрицательный.

Наличие призмы обуславливает несимметричность aberrаций оптической системы относительно её оптической оси, которые не могут быть полностью скомпенсированы осесимметричными деталями — линзами. В первую очередь это проявляется в виде хроматического сдвига изображения перпендикулярно оптической оси. Поэтому компенсация искажений призмы возможна лишь для некоторой узкой области на изображении. Для минимизации остаточного хроматического сдвига эта компенсация выполнена для центра каждого из изображений 6 и 7.

В результате расчёта получена стереосистема с параметрами, представленными в таблице. Наилучшее качество изображения обеспечивается при $s = 15$ мм.

Параметры рассчитанной стереосистемы

Параметр	Значение
Глубина резко изображаемого пространства (s)	5–40 мм
Угловое поле в одном стереоскопическом канале (ω)	$40^\circ \times 45^\circ$
Относительное отверстие	1:8,2
Увеличение	0,18–0,04
Длина	12 мм
Размеры призмы	$2,0 \times 2,5$ мм ²
Внешний диаметр линз	2,3 мм
Фокусное расстояние объектива поз. 5	4 мм
Угловое поле объектива поз. 5 (ω_0)	$14^\circ \times 26^\circ$

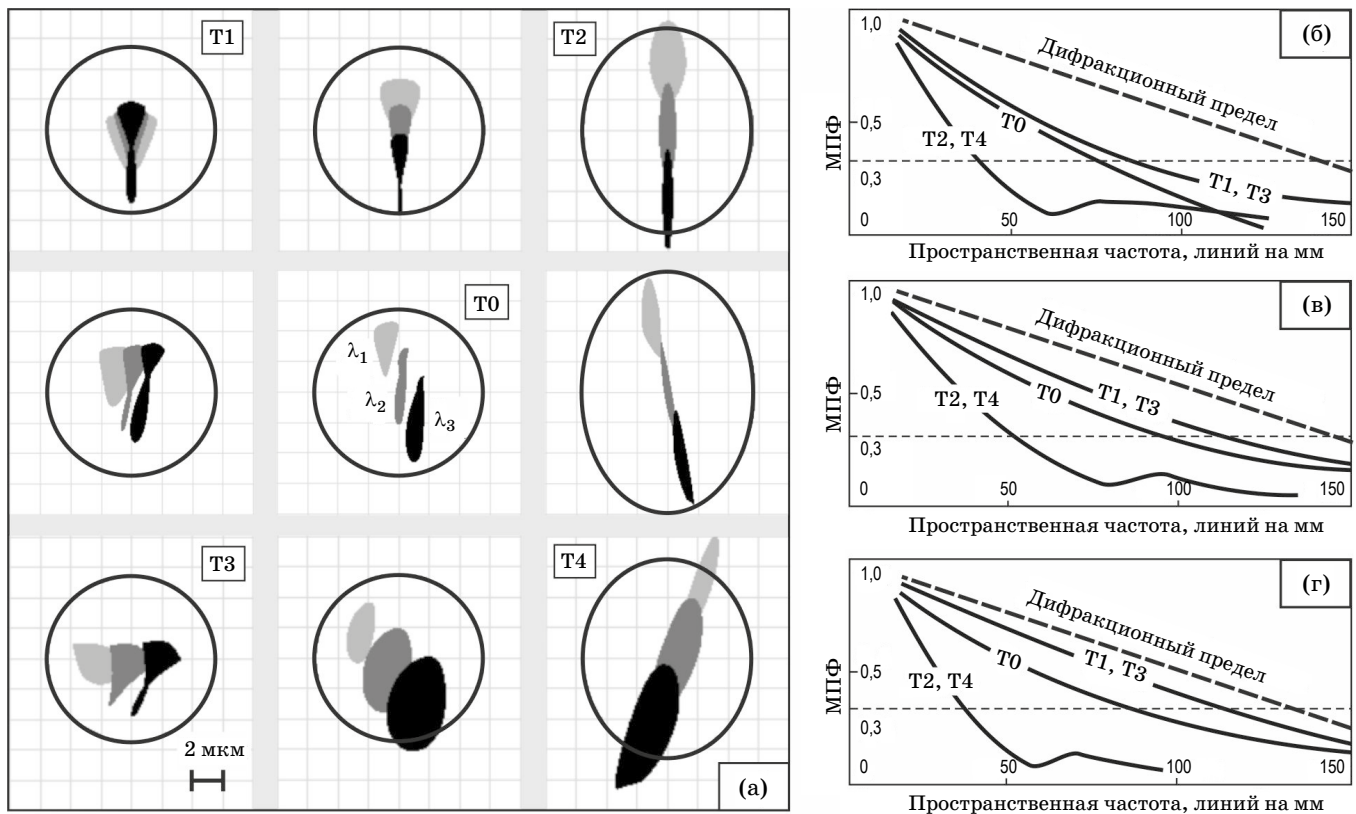


Рис. 2. Диаграммы пятен рассеяния при $s = 15$ мм (а) и графики МПФ при $s = 5$ мм (б), $s = 15$ мм (в), $s = 40$ мм (г).

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Для оценки разрешающей способности разработанного стереоскопического объектива выполнено его моделирование в программе ZEMAX. На рис. 2 представлены результаты анализа качества изображения. Рис. 2а иллюстрирует диаграммы пятен рассеяния, полученные для $s = 15$ мм. Диаметр кружка Эйри составляет 11 мкм. Символами Т0–Т4 обозначены точки изображения, для которых построены графики полихроматической модуляционной передаточной функции (МПФ), приведённые для $s = 5$ мм (рис. 2б), $s = 15$ мм (рис. 2в) и $s = 40$ мм (рис. 2г). Точка Т0 соответствует центру изображения, точки Т2 и Т4 — краю изображения вблизи зоны перекрытия двух частей стереоизображения. В этих точках кружки Эйри вытянуты вследствие виньетирования лучей, идущих вблизи оптической оси, на ребре призмы. Расчёты выполнены для длин волн $\lambda_1 = 480$ нм, $\lambda_2 = 546$ нм, $\lambda_3 = 643$ нм.

Из приведённых данных видно, что разрешающая способность объектива меняется в пределах ГРИП примерно от 70 до 100 лин/мм в центре поля зрения (точка Т0) и от 40 до 60 лин/мм на краю поля зрения (в точках Т2, Т4). Наилучшее качество изображения получено в точках Т1, Т3, где разрешающая способность меняется от 70 до 120 лин/мм по уровню контраста 0,3 (уровень отмечен штрихо-

вой линией на рис. 2б–г). Данные значения близки к параметрам зарубежных устройств и являются приемлемыми для решения задач визуально-измерительного контроля технических объектов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАКЕТА СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОГО ОБЪЕКТИВА

Макет рассчитанной стереоскопической ОС был изготовлен и экспериментально исследован. Его внешний вид представлен на рис. 3.

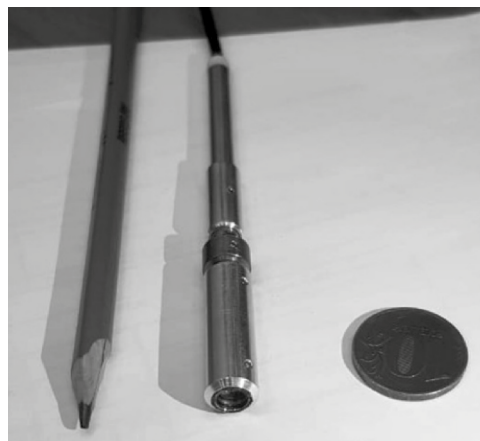


Рис. 3. Внешний вид макета стереоскопической системы.

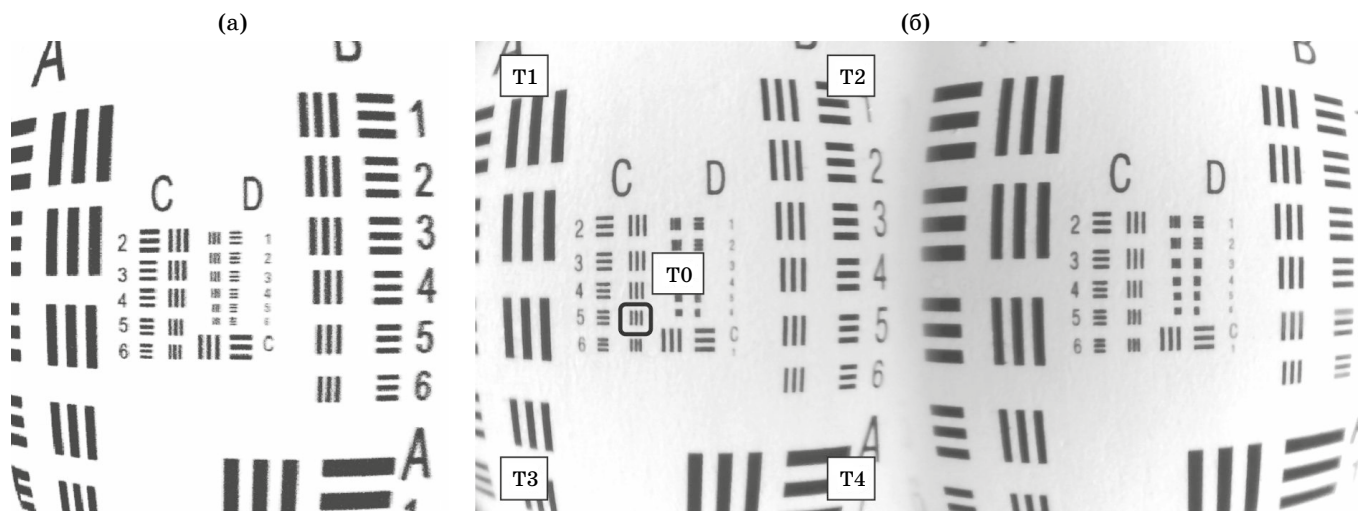


Рис. 4. Изображения тестового объекта: смоделированное (а) и экспериментально полученное (б).

На рис. 4 представлены изображения тестового объекта, расположенного на расстоянии $s = 15$ мм, полученные моделированием в программе ZEMAX (а) и экспериментально с помощью изготовленного макета (б).

На экспериментально полученном снимке рамкой отмечен элемент С5, находящийся вблизи точки Т0. Контраст в изображении этого элемента составляет приблизительно 0,3. Период штрихов в этом элементе составляет 9,5 пикселей, что соответствует физическому размеру 14 мкм и пространственной частоте 70 лин/мм. Таким образом, экспериментально полученное значение разрешающей способности в центре поля зрения при $s = 15$ мм составляет 70 лин/мм, что близко к расчётному значению 100 лин/мм. Отличие обосновано, прежде всего, погрешностями изготовления объектива и неидеальностью тестового объекта.

Аналогичные выводы можно сделать при сравнении теоретических и экспериментальных данных в пределах всего диапазона ГРИП. Например, при $s = 5$ мм измеренное значение разрешающей способности в центре поля составляет 55 лин/мм, а теоретическое — 70 лин/мм; при $s = 40$ мм эти значения составляют 60 лин/мм и 80 лин/мм соответственно.

ОБРАБОТКА СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЙ

Для восстановления трёхмерной структуры объектов и измерения их геометрических параметров необходимо реализовать алгоритмы обработки стереоскопических изображений для геометрической калибровки системы регистрации, улучшения и ректификации изображений, поиска сопряжённых точек и вычисления трёхмерных координат [12]. Алгоритм ректификации изображений

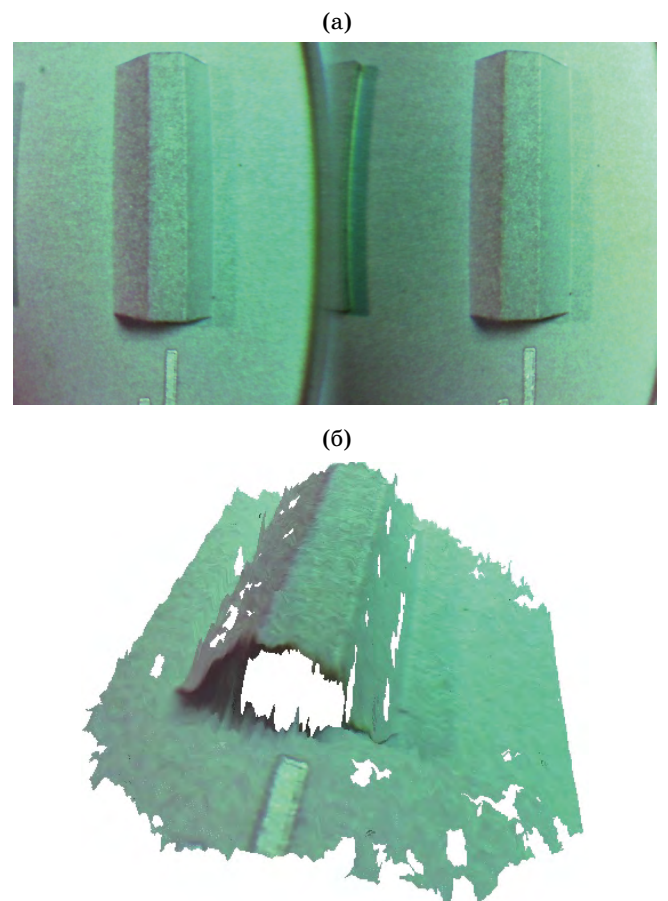


Рис. 5. Зарегистрированное изображение тест-объекта (а) и полученная по изображению трёхмерная структура его поверхности (б).

частично устраняет дисторсию изображений, вносимую ОС, и преобразует их таким образом, что пары сопряжённых точек на изображениях лежат на одной горизонтальной линии,

что позволяет значительно упростить поиск соответствий и уменьшить время вычислений. Алгоритм вычисления трёхмерных координат использует математическую модель формирования изображения, параметры которой определяются при помощи алгоритма калибровки. Такая модель содержит минимум информации, необходимый для вычисления трёхмерных координат точки по её двумерным проекциям на изображениях. Для калибровки разработанной системы использована трассировочная модель, описываемая реальным ходом лучей в призме [13]. Как показано в [14], применение такой модели позволяет учесть специфические искажения, вносимые призмой, что способствует снижению погрешности и расширению диапазона геометрических измерений.

На рис. 5а приведено изображение тест-объекта в виде трапециевидного выступа высотой 1 мм, полученное с помощью разработанной системы с расстояния 30 мм. На рис. 5б показана вычислен-

ная на основе его обработки трёхмерная структура тест-объекта. Погрешность восстановления формы составила в среднем 5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе описана миниатюрная призмочно-линзовая система для одновременной регистрации изображений с разных ракурсов на одном приёмнике излучения. Достаточно широкое поле зрения, значительная глубина резко изображаемого пространства и высокое качество изображения обеспечивают удобство наблюдения, а также широкий диапазон и высокую точность геометрических измерений. Разработанная система технического зрения может быть использована для решения задач измерительной видеэндоскопии и неразрушающего контроля труднодоступных объектов.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 17-19-01355).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Davies E.R.* Computer and machine vision // Theory, algorithms, practicalities. Waltham: Academic Press, 2012. 912 p.
2. *Bratchelor B.G.* Machine vision handbook. London: Springer, 2012. 2271 p.
3. *Beyerer J., León F., Frese C.* Machine vision: automated visual inspection: theory, practice and applications. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. 798 p.
4. *Lorenz P.* The science of remote visual inspection (RVI): Technology, applications, equipment. Lake Success (NY): Olympus Corporation, 1990. 347 p.
5. *Zhang S.* Handbook of 3D machine vision: optical metrology and imaging. Boca Raton (FL): CRC Press; 2008. 414 p.
6. *Leiner D.* Digital endoscope design. Bellingham (WA): SPIE Press, 2016. 33 p.
7. *Huben E., Jervis D.* Advances in three dimensional measurement in remote visual inspection // Proc. of 18th World Conference on Nondestructive Testing. Durban, South Africa. 2012. P. 320–339.
8. *Sasaki M., Koishi T., Nakaguchi T., Tsumura N., Miyake Y.* Absolute length measurement using manually decided stereo correspondence for endoscopy // Proc. of SPIE Medical Imaging. 2009. V. 7261. P. 72610B.
9. *Keller K., State A.* A single-imager stereoscopic endoscope // Proc. of SPIE Medical Imaging. 2011. V. 7964. P. 79641Z.
10. *Bae S., Korniski R., Choi J., Poyan M., Manohara B., Shahinian H.* Development of a miniature single lens dual-aperture stereo imaging system towards stereo endoscopic imaging application // Opt. Eng. 2012. V. 51. Iss. 10. P. 103202.
11. *Bendall C.A., Chiek T.A., Karpen T.W., Lia R.A., Salvati J.R.* Stereo-measurement Borescope with 3-D viewing // Патент США US 7,170,677 B1. 2007.
12. *Forsyth D.A., Ponce J.* Computer vision: a modern approach. Upper Saddle River, USA: Prentice-Hall, 2012. 793 p.
13. *Machikhin A.S., Gorevoy A.V.* Calibration of miniature prism-based stereoscopic imagers for precise spatial measurements // Proc. SPIE. 2016. V. 9917. P. 991707.
14. *Горевой А.В., Мачихин А.С., Хохлов Д.Д., Батшев В.И., Калошин В.А., Перфилов А.М.* Применение трассировочной модели оптико-электронной системы для повышения точности стереоскопических эндоскопических измерений // Дефектоскопия. 2017. № 9. С. 44–53.