

Оценка погрешности измерений геометрических параметров, выполняемых с использованием призмочно-линзовых оптических систем

А.В. Гореvoy^{1,2,3}, А.С. Мачихин^{1,2}

gorevoy.a@gmail.com|aalexanderr@mail.ru

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия;

²НИУ «МЭИ», Москва, Россия;

³МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Использование эндоскопов со стереоскопическими призмочно-линзовыми оптическими системами для проведения визуально-измерительного контроля требует оперативной и надежной оценки погрешности измерений. Известные решения данной задачи основаны на серьезных допущениях, что делает невозможным их применение на практике без дополнительных испытаний. Основным методом оценки погрешности реальных измерений и аттестации приборов остается проведение серий контрольных измерений эталонных объектов. Предложен метод оценки погрешности геометрических измерений, выполненных стереоскопическим методом, подходящий для различных математических моделей устройств регистрации. Применимость метода подтверждена математическим моделированием для значений параметров и условий измерения, типичных для промышленных эндоскопов. Эксперименты с таким прибором показывают, что обычно используемые допущения о независимости погрешности определения соответствующих точек на изображениях приводят к заметному расхождению расчетных и экспериментальных данных. Результаты проведенных исследований могут быть полезны при проектировании измерительных систем на основе стереоскопического метода, а также разработке алгоритмов обработки изображений в подобных системах.

Ключевые слова: стереоскопический метод, трехмерные измерения, видеоэндоскопия, погрешность измерений, призмочно-линзовая оптическая система.

Uncertainty evaluation of geometric parameter measurements performed using prism-based optical system

A.V. Gorevoy^{1,2,3}, A.S. Machikhin^{1,2}

gorevoy.a@gmail.com|aalexanderr@mail.ru

¹Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS, Moscow, Russia;

²National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia;

³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Remote visual inspection using video endoscopes equipped with stereoscopic prism-based optical systems requires operative and robust evaluation of measurement uncertainty. Known solutions are based on significant assumptions which hamper their implementation in practice without additional analysis. Currently, the main method for measurement accuracy estimation and video endoscope certification is multiple control measurements of the test chart parameters. We propose a method for estimating the error of geometric parameters measurements performed by the stereoscopic technique, suitable for different mathematical camera models. Applicability of the method has been confirmed by computer simulation for the parameter values and measurement conditions typical for industrial endoscopes. According to the experimental results obtained with an industrial endoscope, it has been shown that the commonly used assumptions about the independence of the error in determining the corresponding points on the images lead to a significant discrepancy between the calculated and experimental data. The results can be useful for the design of measurement systems based on the stereoscopic method, as well as the development of image processing algorithms for this type of systems.

Keywords: stereoscopic technique, 3D measurements, video endoscope, measurement uncertainty, prism-based optical system.

1. Введение

Эндоскопические системы являются одним из наиболее распространенных и универсальных средств визуально-измерительного контроля (ВИК) внутренних полостей промышленных объектов и сложного оборудования, не подлежащего разборке. К настоящему времени разработано несколько методов измерения трехмерных геометрических параметров выявляемых дефектов, аппаратно и программно реализованных в современных видеоэндоскопах: стереоскопический, многоточечный, теневой и фазовый [3, 5, 14, 15, 19]. Все эти методы основаны на принципе триангуляции. Стереоскопический метод является наиболее распространенным, поскольку при минимальных габаритах зонда позволяет проводить измерения для всех точек на изображении и не требует дополнительной системы подсветки. Реализация данного метода основана на

регистрации двух или более изображений объекта с разных ракурсов. Из-за малого диаметра зондов (как правило, 4-8 мм) размещение двух отдельных объективов и матричных приемников излучения (МПИ) затруднительно. Решением данной проблемы является использование сменных стереоскопических насадок, содержащих призмочно-линзовую оптическую систему (ОС), что позволяет зарегистрировать изображения с двух разных ракурсов на одном МПИ [4, 5, 13]. Калибровка такой системы и определение соответствующих точек на стереоскопических изображениях позволяют вычислять трехмерные координаты точек объекта и производить геометрические измерения [1, 2, 11, 17, 18] в соответствии со схемой, показанной на рис. 1.

Данная схема показывает основные элементы, которые рассматриваются при проектировании видеоэндоскопа с призмочной насадкой как измерительной стереоскопической системы. Поскольку алгоритм

вычисления трехмерных координат и алгоритм калибровки всегда содержат упрощенную математическую модель формирования изображения, то эту модель логично использовать для предварительных расчетов на начальном этапе проектирования и для формулировки требований к ОС и МПИ на следующих этапах [1, 2, 4]. Критерий качества измерительной системы формируется на основе величины погрешности измерения геометрических параметров. Таким образом, для расчетов необходимо иметь метод оценки погрешности, который позволяет рассчитать погрешность измерения трехмерных координат каждой точки рабочего объема при известной погрешности определения координат соответствующих точек на изображениях и погрешности параметров калибровки. Наличие такого метода также необходимо непосредственно в процессе ВИК для выдачи рекомендаций оператору и принятия им оперативных решений о результатах контроля.

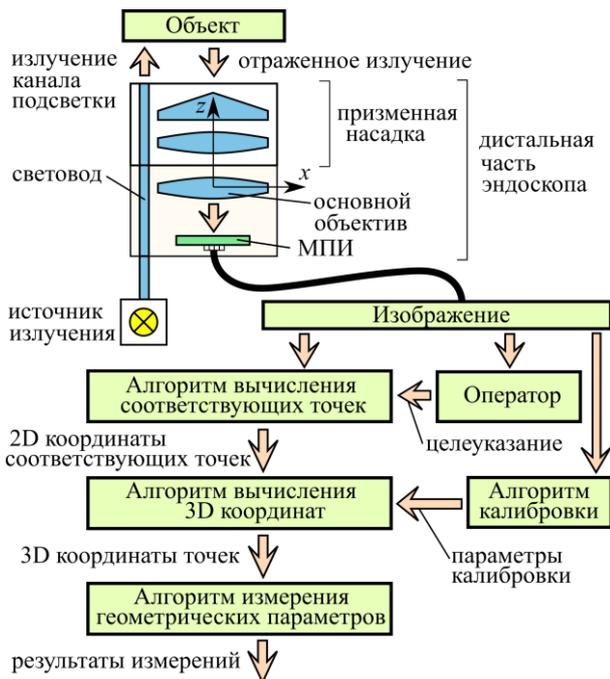


Рис. 1. Структурно-функциональная схема видеэндоскопа с призмной насадкой.

Несмотря на активное развитие аппаратных и программных средств для реализации стереоскопического метода, задача определения погрешности реальных измерений остается недостаточно проработанной. Предложенные решения в области математического моделирования основаны на серьезных допущениях, что делает невозможным их применение на практике для ответственного оборудования ВИК без дополнительных испытаний. Основным методом оценки погрешности реальных измерений и аттестации приборов остается проведение с их помощью серий контрольных измерений эталонных объектов. В данной работе излагаются результаты теоретических и экспериментальных исследований по оценке погрешности измерений, выполненных при помощи эндоскопической системы с призмной насадкой, и анализируется влияние различных допущений на результат.

2. Метод оценки погрешности

Методы оценки погрешности измерения трехмерных координат можно разделить на две группы: использующие анализ интервалов и преобразование распределения вероятностей [1, 2, 9, 10, 16]. В первом случае границы

доверительных интервалов для координат точек на изображениях преобразуются в границы доверительного интервала для измеренных трехмерных координат. Недостатком таких методов являются завышенные значения погрешностей, невозможность учета корреляции исходных параметров и сложность реализации для измерений геометрических параметров, проводимых по нескольким точкам. Вторая группа методов направлена на определение распределения вероятностей для измеренных геометрических параметров по совместному распределению вероятностей для координат точек на изображениях. Из-за сложности вычисления преобразований распределения вероятностей для алгоритма триангуляции, как правило, считают исходное распределение нормальным и используют линейное приближение, что требует вычисления аналитических производных и может приводить к ошибочной оценке.

В данной работе мы используем УТ-метод (unscented transformation [8]), поскольку он позволяет универсальным способом рассчитать среднее значение и среднеквадратическое отклонение (СКО) для различных типов измерений устройств регистрации и различных типов измерений (длина отрезка, площадь фигуры, расстояние от точки до плоскости и т. п.). Такой метод лишен недостатков, присущих методам линеаризации, не требует столь значительных вычислительных затрат, как метод со множеством случайных выборок (Monte-Carlo analysis), и может использоваться для обеих сформулированных выше задач.

Для описания метода примем, что модель формирования изображения записана в виде $\mathbf{p}_i = P_i(E_i(\mathbf{x}))$, где \mathbf{x} – координаты точек объекта в глобальной системе координат (ГСК), \mathbf{p}_i – координаты их изображений для i -й камеры, E_i – оператор преобразования координат из ГСК в систему координат (СК) i -й камеры, P_i – оператор преобразования, определяющего соответствие между координатами точек \mathbf{x}_i в СК камеры и координатами их изображений \mathbf{p}_i . Набор преобразований P_i и E_i параметризуется вектором \mathbf{k} [1, 2, 6]. В случае эндоскопической системы с призмной ОС под формированием изображения i -й камерой следует понимать формирование 1-й (левой) или 2-й (правой) части общего составного изображения [6, 7, 11, 17]. Исходными данными для метода при расчете погрешности измерения трехмерных координат для точки $\bar{\mathbf{x}}$ являются вектор координат изображений $\bar{\mathbf{p}} = (\bar{\mathbf{p}}_1^T, \bar{\mathbf{p}}_2^T)^T$ размерности $N = 4$, где $\bar{\mathbf{p}}_i = P_i(E_i(\bar{\mathbf{x}}))$, и соответствующая ему матрица ковариации Σ_p . Для проведения расчета зададим набор из $(2N + 1)$ сигма-точек $\tilde{\mathbf{p}}_j$ и весовых коэффициентов W_j [8]:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{p}}_0 &= \bar{\mathbf{p}}, & W_0 &= a/(N + a), \\ \tilde{\mathbf{p}}_j &= \bar{\mathbf{p}} + (\sqrt{(N + a)\Sigma_p})_j, & W_j &= 1/2(N + a), \\ \tilde{\mathbf{p}}_{j+N} &= \bar{\mathbf{p}} - (\sqrt{(N + a)\Sigma_p})_j, & W_{j+N} &= 1/2(N + a), \end{aligned}$$

где $j = 1 \dots N$, $(\sqrt{(N + a)\Sigma_p})_j$ – j -я строка квадратного корня из матрицы $(N + a)\Sigma_p$, $a \in \mathfrak{R}$ – параметр. Далее вычислим координаты $\tilde{\mathbf{x}}_j$ для $j = 0 \dots 2N$ при помощи алгоритма триангуляции

$$\tilde{\mathbf{x}}_j = \underset{\tilde{\mathbf{x}}_j}{\operatorname{argmin}} (C(\tilde{\mathbf{x}}_j, \tilde{\mathbf{p}}_j, \mathbf{k})), \tag{1}$$

где C – оценочная функция [1, 2, 6]. В данной работе используется оценочная функция на основе расстояния в ГСК от точки $\tilde{\mathbf{x}}_j$ до лучей $\tilde{\mathbf{l}}_{i,j}$, полученных при помощи обратного преобразования $\mathbf{l}_i = E_i^{-1}(P_i^{-1}(\mathbf{p}_i))$. В итоге среднее значение измеренных трехмерных координат $\hat{\mathbf{x}}$ и соответствующая матрица ковариации $\Sigma_{\mathbf{x}}$ определяются как

$$\hat{\mathbf{x}} = \sum_{j=0}^{2N} W_j \tilde{\mathbf{x}}_j, \quad \Sigma_{\mathbf{x}} = \sum_{j=0}^{2N} W_j (\tilde{\mathbf{x}}_j - \hat{\mathbf{x}})(\tilde{\mathbf{x}}_j - \hat{\mathbf{x}})^T. \quad (2)$$

Данный метод не требует вычисления аналитических производных, позволяет анализировать математическую модель камеры и алгоритм триангуляции как «черный ящик», а также легко обобщается для вычисления погрешности любых геометрических параметров, измеряемых по M опорным точкам. Так, для расстояния r между двумя точками ($M = 2$) в качестве исходных данных будут выступать вектор $\bar{\mathbf{p}} = (\bar{\mathbf{p}}_{1,1}^T, \bar{\mathbf{p}}_{2,1}^T, \bar{\mathbf{p}}_{1,2}^T, \bar{\mathbf{p}}_{2,2}^T)^T$ размерности $N = 4M = 8$, где $\bar{\mathbf{p}}_{i,k} = P_i(E_i(\tilde{\mathbf{x}}_k))$, $k = 1 \dots M$, и матрица ковариации $\Sigma_{\mathbf{p}}$ размера $N \times N$, т. е. 8×8 . После того, как вычислены координаты $\tilde{\mathbf{x}}_{j,k}$ в соответствии с (1) и определены расстояния $\tilde{r}_j = \|\tilde{\mathbf{x}}_{j,1} - \tilde{\mathbf{x}}_{j,2}\|$, среднее значение измеренного расстояния \hat{r} и соответствующее СКО σ_r вычисляются аналогично (2). Таким же образом осуществляется модификация метода для вычисления площади треугольника ($M = 3$), расстояния от точки до плоскости ($M = 4$) и других геометрических параметров.

Отметим, что для данного метода, как и для других методов, использующих преобразование распределения вероятностей, требуется задать матрицы ковариации погрешности измерения координат на изображениях для всех точек, участвующих в рассматриваемом типе измерений. Обычно при предварительных расчетах допускают, что погрешность независима для всех координат, изображений и точек, и используют один параметр σ_p для ее описания [1, 2, 9, 10, 16], т. е. $\Sigma_{\mathbf{p}} = \sigma_p \mathbf{I}$, где \mathbf{I} – единичная матрица размера $N \times N$. Это допущение предполагает, что объект четко определен по обеим координатам (точка, угол, перекрестие, центр круга и т. д.) и основной причиной погрешности является дискретизация и равномерное размытие изображения при наличии некоррелированного шума.

Для выполнения исследований было разработано программное обеспечение (ПО), позволяющее проводить при помощи УТ-метода оценку погрешности различных типов измерений. Данное ПО также было использовано для компьютерного моделирования регистрации точек рабочего объема и получения синтетических данных. При этом модель формирования изображения $\bar{\mathbf{p}}_{i,k} = P_i(E_i(\tilde{\mathbf{x}}_k))$ используется для вычисления вектора $\bar{\mathbf{p}}$ «идеальных» координат набора из M опорных точек, к которым добавляется случайный вектор с заданной матрицей ковариации $\Sigma_{\mathbf{p}}$. Таким образом можно провести проверку правильности работы УТ-метода с помощью метода Монте-Карло для конкретных условий: заданных параметров системы регистрации, рабочего объема и матрицы ковариации погрешности измерения координат на изображениях.

3. Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментов использовался видеозонд Mentor Visual iQ VideoProbe производства GE Inspection Technologies с зондом диаметром 6,1 мм и съемным стереоскопическим адаптером прямого обзора XLG3TM616060FG, обеспечивающим поле зрения каждого канала $60^\circ \times 60^\circ$ [5]. Сначала были зарегистрированы калибровочные серии изображений плоских тест-объектов в виде шахматной доски под различными углами к оси зонда на расстояниях 10..45 мм от него. Изображения проверочной серии были получены при линейном перемещении тест-объектов вдоль оси зонда в диапазонах 12..28 мм и 22..42 мм с шагом 1 мм. Определение координат узлов сетки тест-объекта на изображениях производилось автоматически, согласно алгоритму, описанному в [12]. Пример изображения из калибровочной серии с отмеченными координатами узлов показан на рис. 2.

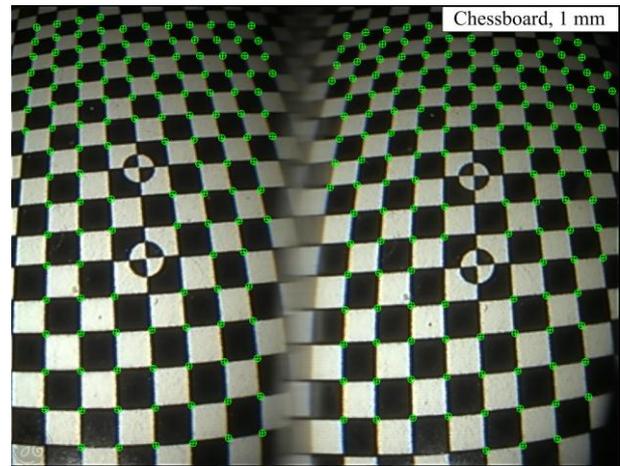


Рис. 2. Пример изображения тест-объекта с вычисленными координатами узлов.

По калибровочной серии изображений были определены параметры трассировочной модели формирования изображения. Как показано в [6, 7], такая модель более подходит для эндоскопа с призмочно-линзовой ОС, чем стандартная проективная модель с полиномиальной дисторсией, и не вносит заметной систематической погрешности. Затем изображения проверочных серий были использованы для вычисления трехмерных координат всех узлов при каждом положении тест-объекта, а также геометрических параметров: расстояния между соседними узлами (x - и y -отрезки, ориентация системы координат приведена на рис. 1), сдвига узла при линейном перемещении (z -отрезки) и расстояния от точки до плоскости. Далее, результаты калибровки, координаты узлов и вычисленные положения тест-объекта были использованы для оценки погрешности измерения тех же геометрических параметров УТ-методом при матрице ковариации $\Sigma_{\mathbf{p}} = \sigma_p \mathbf{I}$ для нескольких значений σ_p .

Полученные значения погрешности $\delta_r = r - \bar{r}$ (r – измеренное значение, \bar{r} – номинальное значение для данного типа измерений) демонстрируют сложную зависимость погрешности измерения от координат точки в пределах рабочего объема. Для проведения количественной оценки рабочий объем был разделен на зоны по z -координате и были вычислены для δ_r среднее значение Δ_r и СКО σ_r в пределах каждой зоны. Результаты для диапазона 12..28 мм показаны на рис. 3 и 4. Номинальные значения отрезков равны 1 мм для всех измерений. Для

сравнения с результатами оценки погрешности УТ-методом рассчитанные с его помощью значения \hat{r} и σ_r также были усреднены в пределах каждой зоны

$$\Delta_r = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \hat{r}_i, \quad \sigma_r = \sqrt{\frac{1}{L} \left(\sum_{i=1}^L \sigma_{r_i}^2 + (\hat{r}_i - \Delta_r)^2 \right)},$$

где L – количество измерений в пределах данной зоны. Полученные значения показаны на рис. 3 и 4 для σ_p , равного 0,05 пикселей, 0,1 и 0,15 пикселей.

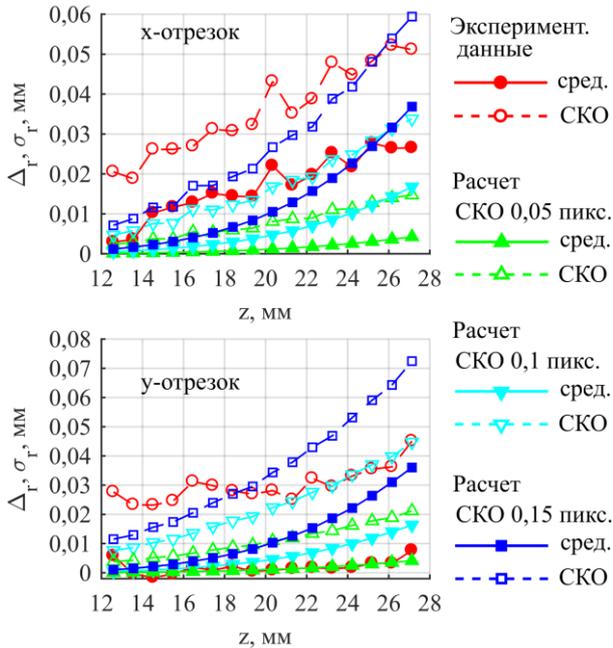


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов для измерения отрезков, перпендикулярных оси зонда.

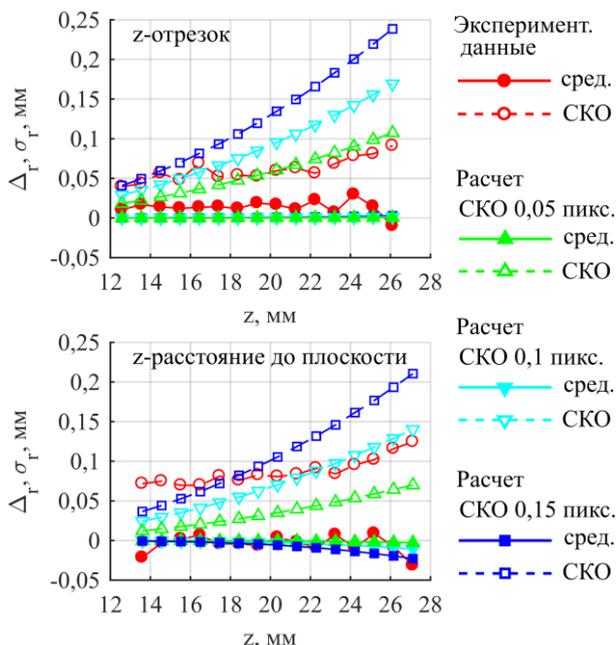


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов для измерения отрезков, параллельных оси зонда.

Как видно из показанных графиков, экспериментальные значения для z -отрезков соответствуют заметно меньшему значению σ_p по сравнению с другими измерениями.

Наиболее вероятной причиной является присутствие корреляции между погрешностями при определении координат одной точки на соседних изображениях серии. В таком случае матрицу ковариации Σ_p размером 8×8 можно представить в виде блочной матрицы

$$\Sigma_p = \begin{pmatrix} \Sigma'_p & \kappa_1 \Sigma'_p \\ \kappa_1 \Sigma'_p & \Sigma'_p \end{pmatrix},$$

где Σ'_p – матрица ковариации для одной точки (размером 4×4), κ_1 – коэффициент корреляции. В самом деле, если провести расчеты УТ-методом для z -отрезков при различных коэффициентах корреляции κ_1 и $\Sigma'_p = \sigma_p \mathbf{I}$, то становится очевидно, что увеличение коэффициента κ_1 приводит к тем же качественным изменениям, что и уменьшение σ_p . Аналогичный вывод следует из сравнения с результатами для измерения расстояния от точки до плоскости, где такая корреляция не может проявиться и результат гораздо ближе к результату для y -отрезков.

Также было проведено исследование влияния коэффициента корреляции погрешности проекций одной точки на двух частях изображения. При этом

$$\Sigma''_p = \begin{pmatrix} \Sigma''_p & \kappa_2 \Sigma''_p \\ \kappa_2 \Sigma''_p & \Sigma''_p \end{pmatrix},$$

где Σ''_p – матрица ковариации (размером 2×2) для одной проекции точки, κ_2 – коэффициент корреляции, κ_1 при этом равен нулю. Результаты расчетов также свидетельствуют о том, что увеличение коэффициента κ_2 аналогично уменьшению σ_p . Этот эффект одинаково проявляется для всех типов измерений. Таким образом, наличие данного типа корреляции не может служить причиной того, что экспериментальные значения для x -отрезков соответствуют большему значению σ_p . Причиной может быть систематическая погрешность, возникающая при калибровке, или другие не учтенные факторы. Кроме того, заметно, что экспериментальные значения для всех типов измерений содержат величину, не зависящую от расстояния, которая может соответствовать погрешности изготовления тест-объекта.

Для проверки используемого метода оценки погрешности используемого метода аналогичные расчеты были проведены для синтетических данных с заданной матрицей ковариации погрешности координат на изображениях по тем же результатам калибровки и вычисленным положениям тест-объекта. Применимость УТ-метода при данных параметрах была подтверждена для всех точек рабочего объема и всех использованных матриц ковариации.

4. Заключение

Проведенные исследования показали, что даже при использовании простого тест-объекта и автоматической обработки изображений полученные значения ошибки измерений не вполне совпадают с расчетными значениями при независимом распределении для всех координат, всех изображений и точек и одинаковом значении СКО для всех точек рабочего объема. Показано, что наличие корреляции, которую обычно не учитывают, способно заметно изменить результат. Тем не менее, положительное значение коэффициента корреляции уменьшает погрешность и одинаково влияет на разные измерения, а значит, расчет для нулевого коэффициента корреляции все равно можно использовать в качестве расчета для наихудшего случая

при сравнении разных вариантов и оптимизации на этапе предварительных расчетов. Из тех же соображений можно использовать такой расчет для выдачи оператору предупреждения о недостаточной точности измерений. Тем не менее, к абсолютным значениям погрешности, рассчитанным при данных допущениях, стоит относиться с осторожностью.

Достоверный учет других факторов, влияющих на вид матрицы ковариации погрешности координат точек на изображении для каждой точки рабочего объема, весьма затруднителен. Такими факторами являются текстура объекта, по-разному проявляющаяся при разном увеличении и освещении, асимметричное пятно рассеяния ОС, искажения, возникающие в электронном тракте. Поставить эксперимент так, чтобы разделить эти факторы, не представляется возможным. Более точные расчеты требуют детального моделирования процесса регистрации изображений с учетом освещенности и работы конкретного алгоритма определения соответствий. Такой подход не применим для предварительных вычислений, но может быть в дальнейшем использован для более подробных расчетов на следующих этапах проектирования совместно с разработкой алгоритмов обработки изображений.

5. Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-19-01355). В части компьютерного моделирования исследование поддержано Российским фондом фундаментальных исследований (проект 17-29-03469).

6. Литература

- [1] Горевой, А.В., Колочкин, В.Я. Методы оценки погрешности измерения координат в комплексированных системах регистрации трехмерных образов объектов. *Инженерный журнал: наука и инновации* **9**: 45 (2013).
- [2] Горевой, А.В., Мачихин, А.С., Перфилов, А.М. Вычисление погрешности бесконтактного измерения площади дефектов на поверхностях сложной формы при видеоэндоскопическом контроле. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики* **4(92)**: 140-148 (2014).
- [3] Мачихин, А.С. Измерительные возможности современных видеоэндоскопов. *Двигатель* **3**: 8-9 (2009).
- [4] Мачихин, А.С., Батшев, В.И. Проблемы создания стереоскопических объективов для видеоэндоскопов. *Инженерный журнал: наука и инновации* **7**: 1-6 (2013).
- [5] General Electric Company. Mentor Visual iQTM VideoProbeTM. https://www.gemeasurement.com/sites/gemc.dev/files/gea31352b_mentor_visual_iq_spect_sheet_r4.pdf
- [6] Gorevoy, A.V., Machikhin, A.S. Calibration of miniature prism-based stereoscopic imagers for precise spatial measurements. *Proc. SPIE* **9917**: 991707 (2016).
- [7] Gorevoy, A.V., Machikhin, A.S., Shurygin, A.V., Khokhlov, D.D., Naumov, A.A. 3D spatial measurements by means of prism-based endoscopic imaging systems. *ГРАФИКОН'2016 Труды 26-й Международной научной конференции*, 253-256 (2016).
- [8] Julier, S.J., Uhlmann, J.K. A consistent, unbiased method for converting between polar and cartesian coordinate systems. *The Proceedings of AeroSense: Acquisition, Tracking and Pointing XI* **3086**: 110-121 (1997).
- [9] Kee, W.L., Bai, Y., Lim, K.B. Parameter error analysis of singlelens prism-based stereovision system. *J. Opt. Soc. Am. A* **32**: 367-373 (2015).

- [10] Lia, Y., Zhang, J., Tian, J. Error Analysis in Stereo Vision for Location Measurement of 3D Point. *Proc. SPIE* **9813**: 981315 (2015).
- [11] Lim, K.B., Qian B. Biprism distortion modeling and calibration for a single-lens stereovision system. *J. Opt. Soc. Am. A* **33**: 2213-2224 (2016).
- [12] Mallon J., Whelan P.F.: Which pattern? Biasing aspects of planar calibration patterns and detection methods, *Pattern Recognition Letters* **28**: 921-930 (2007).
- [13] Nakano, S., Hori, F., Ogawa, K. Endoscopic device and endoscopic image distortion correction method. US Patent US20100004507A1 (2010).
- [14] Ng, A. Advances in 3D Video Borescope Measurement Technologies for Defect Characterization. *Proc. of NDT Malaysia* (2015). http://www.ndt.net/events/MINDTCE-15/app/content/Paper/33_Ng.pdf
- [15] Olympus Corporation. Последние достижения в области дистанционного визуального контроля и стереоизмерений. http://www.olympus-ims.com/en/downloads/download/?file=285216841&fl=ru_RU
- [16] Rodriguez, J.J., Aggarwal, J.K. Stochastic analysis of stereo quantization error. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **12**: 467-470 (1990).
- [17] Wu, L., Zhu, J., Xie, H. A modified virtual point model of the 3d dic technique using a single camera and a bi-prism. *Measurement Science and Technology* **25**: 115008 (2014).
- [18] Zhang, S. *Handbook of 3D Machine Vision: Optical Metrology and Imaging, Series in Optics and Optoelectronics*. CRC Press (2016).
- [19] Zhu, Y.-K., Tian, G.-Y., Lu, R.-S., Zhang, H. A review of optical NDT technologies. *Sensors* **11**: 7773-7798 (2011).

Об авторах

Горевой Алексей Владимирович — м.н.с. НТЦ УП РАН, инженер НИУ МЭИ, инженер МГТУ им. Н.Э. Баумана. Email: gorevoy.a@gmail.com.

Мачихин Александр Сергеевич — в.н.с. НТЦ УП РАН, доцент НИУ МЭИ. Email: aalexanderr@mail.ru.