

УДК 004.932.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОЩАДИ ДЕФЕКТОВ НА ПОВЕРХНОСТЯХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ПРИ ВИДЕОЭНДОСКОПИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ

А.В. Горевой^a, А.С. Мачихин^b, А.М. Перфилов^{c, d}^a МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия^b Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия, aalexanderr@mail.ru^c ОАО «НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко», Химки, Россия^d Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия,

Аннотация. Рассмотрена задача бесконтактного измерения площади поверхностных дефектов на объектах сложной формы при видеоэндоскопическом контроле. Впервые проанализированы основные факторы, определяющие погрешность подобных измерений. Основу предлагаемого метода анализа составляет оценка трехмерных координат точек поверхности по их двумерным проекциям, полученная с использованием проективной модели систем регистрации и минимизации расстояния Махаланобиса в плоскостях изображений. Аналитически для практически важных случаев цилиндрической и сферической поверхностей получены выражения для погрешности измерения ее площади, вызванной аппроксимацией набором треугольников. Показано, что при реальных значениях параметров опико-электронной системы эндоскопического зонда величина этой составляющей погрешности для отдельного треугольника не превышает 1%. Получены выражения для ошибки измерения площади произвольной формы, вызванной неточностью измерения трехмерных координат отдельных точек с учетом и без учета априорной информации о форме поверхности. Проверка полученных выражений на данных реального эксперимента показала, что погрешность измерения площади сложной фигуры, заданной набором точек, в основном определяется отсутствием учета принадлежности этих точек к поверхности. Установлено, что использование априорной информации о форме исследуемой поверхности, которая зачастую доступна из конструкторской документации, могла бы во многих случаях радикально повысить точность измерения площади поверхностных дефектов. Представленные результаты справедливы для стереоскопического, теневого и фазового методов видеоэндоскопических измерений и могут быть эффективно использованы при разработке новых и модернизации существующих бесконтактных измерительных эндоскопических систем.

Ключевые слова: визуально-измерительный контроль, измерение площади поверхности, видеоэндоскопия, измерительный эндоскоп, погрешность измерений, триангуляция.

ACCURACY EVALUATION FOR THE NON-CONTACT DEFECT AREA MEASUREMENT AT THE COMPLEX-SHAPE SURFACES UNDER VIDEOENDOSCOPIC CONTROL

A.V. Gorevoy^a, A.S. Machikhin^b, A.M. Perfilov^{c, d}^a Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia^b Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation RAS, Moscow, Russia, aalexanderr@mail.ru^c JSC «NPO Energomash named after academician V.P.Glushko», Khimki, Russia;^d ITMO University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The problem of non-contact surface defect area measurement at complex-shape objects under videoendoscopic control is considered. Major factors contributing to the measurement uncertainty are analyzed for the first time. The proposed method of accuracy analysis is based on the evaluation of 3D coordinates of surface points from 2D projections under assumption of projective camera model and Mahalanobis distance minimization in the image plane. Expressions for area measurement error caused by sum-of-triangles approximation are obtained analytically for practically important cases of cylindrical and spherical surfaces. It is shown that the magnitude of this error component for a single triangle does not exceed 1% for the real values of parameters of the endoscopic imaging system. Expressions are derived for area measurement uncertainty evaluation on arbitrary shape surfaces, caused by measurement errors of 3D coordinates of individual points with and without a priori information about surface shape. Verification of the obtained expressions with a real experiment data showed that area measurement error for a complex figure, given by a set of points, is mainly caused by ignoring the fact that these points belong to the surface. It is proved that the use of a priori information about investigated surface shape, which is often available from the design documentation, in many cases would radically improve the accuracy of surface defects area measurement. The presented results are valid for stereoscopic, shadow and phase methods of video endoscopic measurements and can be effectively used in development of new non-contact measuring endoscopic systems and modernization of existing ones.

Keywords: visual and measuring control, surface area measurement, videoendoscopy, measuring endoscope, measurement accuracy, triangulation.

Введение

В настоящее время визуально-измерительный контроль (ВИК) является обязательной процедурой при производстве, сборке и испытаниях многих промышленных объектов: авиационных и ракетных двигателей, трубопроводов, баллонов высокого давления и др. [1–3]. Основными целями ВИК являются анализ состояния поверхности, выявление и оценка размеров имеющихся дефектов (трещин, коррозии, отложений и т.п.).

При контроле состояния труднодоступных внутренних полостей неразборных или не подлежащих разборке объектов основными инструментами ВИК являются эндоскопы [2, 3]. Данные приборы позволяют не только визуализировать, но также зарегистрировать и обработать изображение исследуемого объекта. Для измерения трехмерных геометрических параметров выявляемых дефектов к настоящему времени разработано несколько методов, аппаратно и программно реализованных в современных зарубежных видеоэндоскопах: стереоскопический, многоточечный, теневой и фазовый [4, 5]. Все они основаны на вычислении координат точек объекта в трехмерном пространстве и не учитывают форму в окрестности этих точек, что приводит к значительным погрешностям при проведении геометрических измерений. При измерении линейных размеров повышение точности возможно за счет указания пользователем большего количества точек, а при измерении площадей это затруднительно. Площадь замкнутого многоугольника вычисляется как сумма площадей плоских треугольников, на которые этот многоугольник разбивается с помощью заданного разработчиком метода. Так как алгоритм разбиения неизвестен, то оценить точность проводимых измерений невозможно. Для иллюстрации данной проблемы на рис. 1 приведен пример измерения стереоскопическим методом одного и того же эталонного объекта в виде прямоугольника площадью 125 мм^2 на миллиметровой бумаге. Видно, что при одинаковом наборе заданных точек измерение на плоской поверхности (рис. 1, а) производится достаточно точно, а на цилиндрической (рис. 1, б) – с существенной погрешностью. Приведенные результаты не являются случайными и демонстрируют значения площади, наиболее близкие к истинному, полученные в серии из 10 независимых идентичных экспериментов.

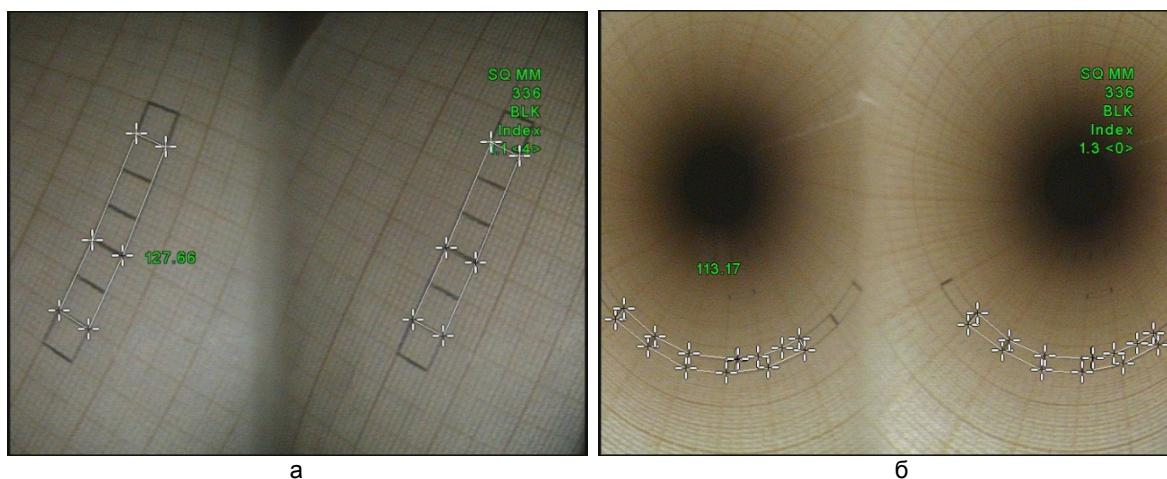


Рис. 1. Результаты измерения площади эталонного объекта на миллиметровой бумаге с помощью видеоэндоскопа стереоскопическим методом на плоской (а) и цилиндрической (б) поверхностях. Численно около выделенного многоугольника показана его площадь, измеренная в автоматическом режиме

Вычисление погрешности измерений является обязательной процедурой для обеспечения метрологической достоверности получаемых результатов [1, 6]. В настоящее время серийно выпускаемая видеоэндоскопическая техника не является специализированной, предназначена для решения широкого круга задач и поэтому требует существенной адаптации для достижения приемлемой точности проведения геометрических измерений дефектов на поверхности конкретного объекта. Данные о погрешности измерений, приводимые разработчиками, основаны лишь на известных результатах теоретических исследований триангуляционного метода или результатах экспериментального исследования тест-объектов простой формы [4, 7, 8]. Исходя из этого, как правило, для ВИК каждой поверхности узла подбираются оптимальные параметры регистрации и положение зонда относительно объекта, изготавливается механическая оснастка, строго регламентируется процесс измерения.

Так как все существующие измерительные видеоэндоскопы представляют собой не допускающие доработки законченные аппаратно-программные комплексы, алгоритмы обработки данных в которых скрыты разработчиками [5], то существует необходимость оценки погрешности измерений, исходя из условий эксперимента – положения и количества указанных пользователем точек, свойств исследуемой поверхности и прочих факторов.

Настоящая работа посвящена исследованию источников этой погрешности и разработке способа ее вычисления и возможности ее снижения за счет учета свойств исследуемой поверхности.

Постановка задачи

Для описания оптико-электронных систем (ОЭС) структурированной подсветки и регистрации введем геометрическую модель $\mathbf{p}_i = P_i \circ E_i(\mathbf{x})$, где \mathbf{x} и \mathbf{p}_i – координаты точек объекта в глобальной

системе координат (ГСК) и координаты их изображений для i -й ОЭС; $i = 1..N$, N – количество ОЭС; E_i – оператор преобразования координат из ГСК в систему координат (СК), связанную с i -й ОЭС; P_i – оператор преобразования, определяющего соответствие между координатами точек $A(x, y, z)$ в СК ОЭС и координатами их изображений $a_i(u, v)$ (рис. 2). Знаком « \circ » обозначена композиция операторов преобразований, т.е. их последовательное применение: $P_i \circ E_i(\mathbf{x}) \equiv P_i(E_i(\mathbf{x}))$. Количество ОЭС N определяется используемым методом измерения: при стереоскопическом используется 2 канала регистрации ($N = 2$), при теневом – один канал структурированной подсветки и один канал регистрации ($N = 2$), при фазовом – два канала структурированной подсветки и один канал регистрации ($N = 3$).

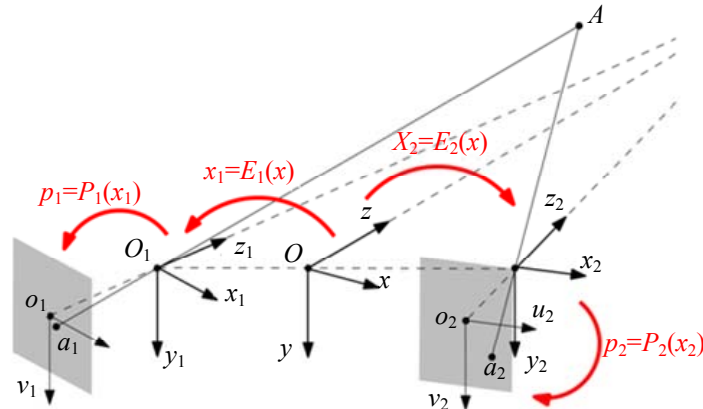


Рис. 2. Используемая геометрическая модель ОЭС ($N = 2$)

Преобразование P_i задает однозначное соответствие лучей $L(O, A)$ в пространстве предметов и точек в плоскости изображения $P: L(O, A) \rightarrow a(u, v)$. Для оценки трехмерных координат точки методом триангуляции модель ОЭС должна быть обратимой и предоставлять возможность получить обратное преобразование $P^{-1}: a(u, v) \rightarrow L(O, A)$. Такой моделью является проективная модель, которая достаточно точно описывает процесс формирования изображения ОЭС с полем зрения в пределах 60° [9]. В случае использования более широкоугольных ОЭС могут использоваться и другие модели, наиболее универсальной из которых является полиномиальная [10, 11].

Пространственное расположение в трехмерном евклидовом пространстве ОЭС проекции и регистрации описывается набором преобразований между СК, связанными с каждым из этих устройств. Выбрав одну из СК в качестве глобальной, зададим набор преобразований $(\mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i)$, связывающих координаты точки в i -й СК $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ с ее координатами в ГСК \mathbf{x}_g выражением $\mathbf{x}_i = E_i(\mathbf{x}_g) = \mathbf{R}_i \mathbf{x}_g + \mathbf{t}_i$. Преобразование между двумя произвольными i -й и j -й СК определяется соотношениями [7, 12]

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{i \rightarrow j} &= \mathbf{R}_j \mathbf{R}_i^{-1}, \\ \mathbf{t}_{i \rightarrow j} &= \mathbf{t}_j - \mathbf{R}_j \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{t}_i. \end{aligned} \tag{1}$$

Набор преобразований P_i и E_i , описывающих характеристики и взаимное расположение ОЭС, параметризуется вектором $\mathbf{v} = (\mathbf{v}_1^T, \dots, \mathbf{v}_N^T)^T$, компоненты которого определяются в процессе предварительной калибровки [7, 9–13].

Решаемая в настоящей работе задача – оценка трехмерных координат точки \mathbf{x} по N зарегистрированным изображениям $\mathbf{p}_i = P_i(\mathbf{x})$, $i = \overline{1, N}$ – может рассматриваться как определение координат пересечения лучей $L_i = P_i^{-1}(\mathbf{p}_i)$. Из-за наличия ошибок в определении координат сопряженных точек \mathbf{p}_i эти лучи являются скрещивающимися, а алгоритм триангуляции T используется для оценки параметра $\hat{\mathbf{x}}$, минимизирующей некоторый критерий C .

Используя ранее введенные обозначения, представим алгоритм триангуляции в виде

$$\hat{\mathbf{x}} = T(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \underset{\hat{\mathbf{x}}}{\operatorname{argmin}} (C(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{p}, \mathbf{v})). \tag{2}$$

Выбор критерия минимизации в общем случае не очевиден и в значительной мере зависит от априорных данных о положении точки \mathbf{x} , ее изображений \mathbf{p}_i , преобразованиях P_i и от характера ошибок в определении координат. Если отклонение измеренных координат изображения точки \mathbf{p}_i от их истинного

значения $\bar{\mathbf{p}}_i$ соответствует нормальному распределению $N(\mathbf{0}, \Sigma_{\mathbf{p}_i})$, то оптимальным является алгоритм, минимизирующий расстояние Махаланобиса в плоскостях изображений устройств регистрации, т.е. [7, 14]

$$C = \sum_{i=1}^N \|\mathbf{p}_i - P_i \circ E_i(\hat{\mathbf{x}})\|_{\Sigma}^2 = \sum_{i=1}^N (\mathbf{p}_i - \hat{\mathbf{p}}_i)^T \Sigma_{\mathbf{p}_i}^{-1} (\mathbf{p}_i - \hat{\mathbf{p}}_i), \quad (3)$$

где $\hat{\mathbf{p}}_i = P_i \circ E_i(\hat{\mathbf{x}})$ – оценка координат скорректированного положения изображения точки $\hat{\mathbf{x}}$ в плоскости изображений i -го устройства регистрации, а $\Sigma_{\mathbf{p}_i}^{-1}$ – обратная (с учетом ранга) матрица ковариации измерения координат для \mathbf{p}_i , причем $\Sigma_{\mathbf{p}} = \text{diag}(\Sigma_{\mathbf{p}_1}, \Sigma_{\mathbf{p}_2}, \dots, \Sigma_{\mathbf{p}_N})$. Оценка координат точки $\hat{\mathbf{x}}$, полученная в результате минимизации критерия (3) будет асимптотически несмещенной и эффективной в пределе для малых шумов, и такой алгоритм дает оценку с минимальной дисперсией, соответствующей неравенству Рао–Крамера [14].

На основе данной модели рассмотрим основные факторы, дающие вклад в погрешность измерения координат отдельных точек $\hat{\mathbf{x}}$ и площади в целом, и оценим их относительную величину.

Учет формы исследуемой поверхности

Проведем оценку погрешности измерения площади поверхности, ограниченной контуром, считая, что он задан набором точек, принадлежащих поверхности, а ограниченная контуром фигура разбивается на плоские треугольники, сумма площадей которых определяет искомую площадь поверхности. В таком случае оценку погрешности измерения площади можно рассматривать для одного треугольника. Ввиду отсутствия аналитического решения для произвольной поверхности ограничимся рассмотрением двух практически важных случаев – цилиндрической и сферической поверхностей.

Зададим цилиндр с радиусом r_0 , ось вращения которого совпадает с осью Oz (рис. 3, а) и рассмотрим треугольник ΔABC , у которого вершина A находится на оси Ox , сторона AB лежит в плоскости xOy , а сторона AC – в плоскости xOz параллельно оси Oz .

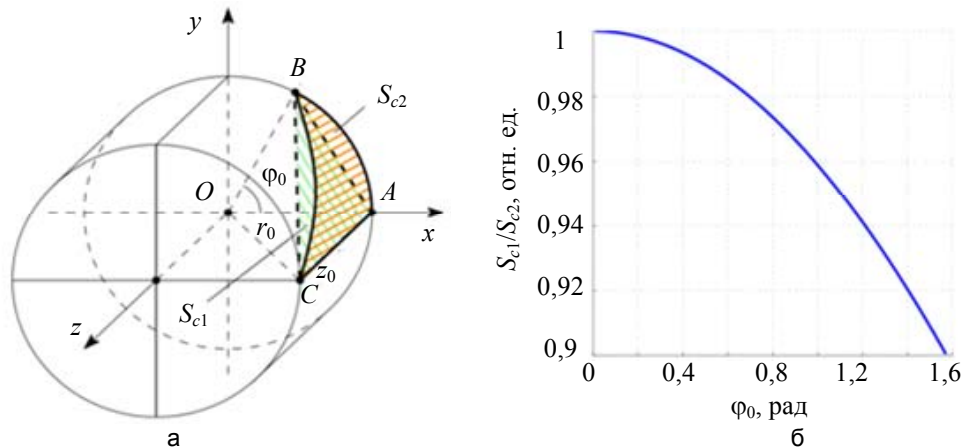


Рис. 3. К вычислению площади S_{c2} треугольника ΔABC на цилиндрической поверхности: система координат (а); зависимость S_{c1}/S_{c2} от полярного угла φ_0 (б)

Можно показать, что площадь треугольника ΔABC определяется по формуле

$$S_{c1} = \frac{1}{2} z_0 \sqrt{r_0^2 (1 - \cos \varphi_0)^2 + r_0^2 \sin^2 \varphi_0} = r_0 z_0 \sqrt{\frac{1 - \cos \varphi_0}{2}}. \quad (4)$$

Площадь поверхности цилиндра, ограниченной дугами AB и BC и прямой AC , можно определить следующим образом:

$$S_{c2} = \int_0^{z_0} \int_0^{\varphi_{BC}(z)} r \, d\varphi \, dz = r_0 \int_0^{z_0} \frac{(z_0 - z) \sin \varphi_0}{z + (z_0 - z) \cos \varphi_0} \, dz = r_0 z_0 \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \left(\text{ctg} \frac{\varphi_0}{2} \right) \right). \quad (5)$$

При ограничении значения угла φ_0 диапазоном от 0 до π с учетом $\pi/2 - \arctg(\text{ctg}(\varphi_0/2)) = \varphi_0/2$ выражение (5) упрощается, тогда отношение площадей, найденных по формулам (4) и (5) будет равно

$$\frac{S_{c1}}{S_{c2}} = \frac{\sqrt{2 - 2 \cos \varphi_0}}{\varphi_0} = \frac{l/r_0}{\arccos(1 - 0,5(l/r_0)^2)}, \quad (6)$$

где $l = \|AB\|$. Из (6) видно, что погрешность измерения площади на поверхности цилиндра зависит только от отношения l/r_0 длины стороны AB к радиусу цилиндра r_0 .

Для случая измерения площади на сферической поверхности зададим сферу с радиусом r_0 , центр которой совпадает с началом координат O (рис. 4, а) и рассмотрим треугольник ΔABC , у которого вершина A находится на оси Ox , сторона AB лежит в плоскости xOy , а сторона AC – в плоскости xOz .

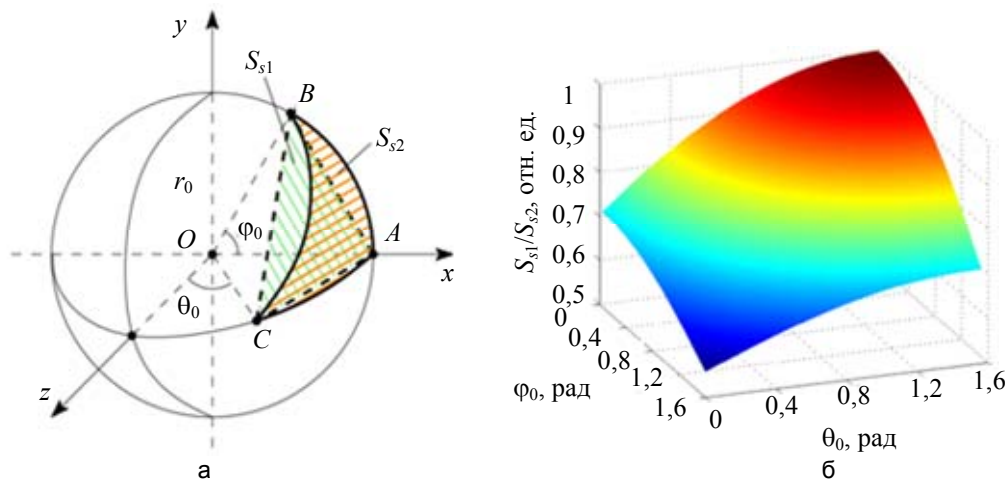


Рис. 4. К вычислению площади S_{s2} треугольника ΔABC на сферической поверхности: система координат (а); зависимость S_{s1}/S_{s2} от углов φ_0 и θ_0 (б)

ы

Записав координаты вершин треугольника ΔABC в сферической системе координат $A(r_0, 0, \pi/2)$, $B(r_0, \varphi_0, \pi/2)$, $C(r_0, 0, \theta_0)$ и в декартовой системе координат $A(r_0, 0, 0)$, $B(r_0 \cos \varphi_0, r_0 \sin \varphi_0, 0)$, $C(r_0 \sin \theta_0, 0, r_0 \cos \theta_0)$, вычислим площадь треугольника ΔABC :

$$S_{s1} = \frac{1}{2} \|AB \times AC\| = \frac{r_0^2}{2} \sqrt{\sin^2 \varphi_0 \cos^2 \theta_0 + (\cos \varphi_0 - 1)^2 \cos^2 \theta_0 + (\sin \theta_0 - 1)^2 \sin^2 \varphi_0}. \quad (7)$$

Для расчета площади поверхности сферы, ограниченной дугами AB , AC и BC , воспользуемся формулами сферической тригонометрии [15]. Сферический треугольник ΔABC является прямоугольным, так как угол при вершине A равен $\pi/2$. Углы при вершинах B и C можно найти по формулам

$$\begin{aligned} \angle B &= \arccos(\varphi_0 \arccos(\cos \varphi_0 \sin \theta_0)), \\ \angle C &= \arccos((\pi/2 - \theta_0) \arccos(\cos \varphi_0 \sin \theta_0)). \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда искомую площадь S_{s2} сферического треугольника с учетом (8) можно вычислить как

$$S_{s2} = r_0^2 (\angle A + \angle B + \angle C - \pi) = r_0^2 (\angle A + \angle B - \pi/2). \quad (9)$$

Отношение площадей, найденных по формулам (7) и (9), не зависит от радиуса сферы r_0 , а определяется лишь величиной углов φ_0 и $(\pi/2 - \theta_0)$, которые опираются на стороны AB и AC , вершиной которых является центр сферы.

Из графиков на рис. 3, б, и рис. 4, б, видно, что при реальных значениях углов φ_0 и θ_0 погрешность измерения площади, вызванная аппроксимацией плоскими треугольниками, на цилиндрической и сферической поверхностях составляет менее 1%, что для измерений, показанных на рис. 1, соответствует приблизительно 1 мм^2 . Таким образом, погрешность измерения площади, вызванная аппроксимацией участка неплоской поверхности набором плоских треугольников, не является основной и ею не может определяться неточность измерения площади в эксперименте.

Учет погрешности измерения трехмерных координат точек

Для определения зависимости погрешности оценки трехмерных координат точки \hat{x} от погрешности определения координат изображений точек p , при использовании алгоритма триангуляции (2) воспользуемся теоремой, приведенной в работе [16]. После подстановки выражения для используемого критерия (3) и ряда преобразований получим выражения для частных производных смещения оценки и матрицы ковариации:

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{x}}}{\partial \mathbf{p}} = \left(\frac{\partial \mathbf{p}^T}{\partial \mathbf{x}} \Sigma_p^{-1} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{p}^T}{\partial \mathbf{x}} \Sigma_p^{-1}, \quad (10)$$

$$\Sigma_x = \frac{\partial \hat{\mathbf{x}}}{\partial \mathbf{p}} \Sigma_p \frac{\partial \hat{\mathbf{x}}^T}{\partial \mathbf{p}} = \left(\frac{\partial \mathbf{p}^T}{\partial \mathbf{x}} \Sigma_p^{-1} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}} \right)^{-1}, \quad (11)$$

где $\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}} = \left(\left(\frac{\partial P_1}{\partial \mathbf{x}_1} \frac{\partial E_1}{\partial \mathbf{x}} \right)^T, \left(\frac{\partial P_2}{\partial \mathbf{x}_2} \frac{\partial E_2}{\partial \mathbf{x}} \right)^T, \dots, \left(\frac{\partial P_N}{\partial \mathbf{x}_N} \frac{\partial E_N}{\partial \mathbf{x}} \right)^T \right)^T$. Данные выражения получены для случая, когда

калибровка системы проведена без ошибок, а преобразования P_i и E_i определены точно. Аналогичные выражения, учитывающие погрешности калибровки, приведены в работе [17].

Далее, согласно выражениям (10) и (11), будут даны оценки погрешности измерения площади, вызванной неточностью измерения трехмерных координат точек, в показанном на рис. 1 эксперименте.

Учет формы поверхности при триангуляции

Рассмотрим работу алгоритма триангуляции с учетом принадлежности точек A поверхности определенного типа. Будем считать, что поверхность задана в параметрической форме: координаты точек \mathbf{x} , принадлежащих поверхности, можно выразить через вектор параметров положения $\mathbf{a} = (a, b)^T$ в виде функции $\mathbf{x} = S(\mathbf{a})$. В данном случае координаты точек \mathbf{x} приводятся в СК, связанной с задаваемой поверхностью, для перехода в ГСК будем использовать преобразование $\mathbf{x}_g = E_s(\mathbf{x}) = \mathbf{R}_s \mathbf{x} + \mathbf{t}_s$, для переходов в другие СК – выражение (1). Параметры, описывающие \mathbf{R}_s и \mathbf{t}_s , и дополнительные параметры, входящие в функцию $S(\mathbf{a})$, например, радиус цилиндрической или сферической поверхности, запишем в виде вектора параметров поверхности \mathbf{v}_s . С учетом введенных обозначений алгоритм триангуляции может быть представлен в виде

$$\hat{\mathbf{a}} = T(\mathbf{p}, \mathbf{v}, \mathbf{v}_s) = \underset{\hat{\mathbf{a}}}{\operatorname{argmin}} (C(\hat{\mathbf{a}}, \mathbf{p}, \mathbf{v}, \mathbf{v}_s)). \quad (12)$$

Для определения трехмерных координат точки \mathbf{x} по N зарегистрированным изображениям \mathbf{p}_i , как и ранее, оптимально использовать алгоритм, который минимизирует расстояние Махаланобиса (3) в плоскостях изображений устройств регистрации, т.е.

$$C = \sum_{i=1}^N \|\mathbf{p}_i - P_i \circ E_i \circ E_s \circ S(\hat{\mathbf{a}})\|_{\Sigma}^2 = \sum_{i=1}^N (\mathbf{p}_i - \hat{\mathbf{p}}_i)^T \Sigma_{p_i}^{-1} (\mathbf{p}_i - \hat{\mathbf{p}}_i). \quad (13)$$

Отличием выражений (12) и (13) от (2) и (3) является то, что в результате минимизации будет получена оценка параметров $\hat{\mathbf{a}}$, определяющих координаты точки на поверхности. Для перехода к трехмерным координатам в ГСК требуется применить известное преобразование $\hat{\mathbf{x}}_g = E_s(S(\hat{\mathbf{a}}))$.

Для определения зависимости погрешности оценки $\hat{\mathbf{x}}$ от погрешности определения \mathbf{p}_i при использовании алгоритма триангуляции (12), учитывающего принадлежности точек поверхности, следует сначала определить зависимость погрешности параметров $\hat{\mathbf{a}}$ от погрешности определения \mathbf{p}_i . Для этого воспользуемся той же теоремой, что и в предыдущем случае, и после подстановки выражения для используемого критерия (13) и ряда преобразований получим выражения для частных производных смещения оценки и матрицы ковариации:

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{a}}}{\partial \mathbf{p}} = \left(\frac{\partial \mathbf{p}^T}{\partial \mathbf{a}} \Sigma_p^{-1} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{a}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{p}^T}{\partial \mathbf{a}} \Sigma_p^{-1}, \quad (14)$$

$$\Sigma_a = \frac{\partial \hat{\mathbf{a}}}{\partial \mathbf{p}} \Sigma_p \frac{\partial \hat{\mathbf{a}}^T}{\partial \mathbf{p}} = \left(\frac{\partial \mathbf{p}^T}{\partial \mathbf{a}} \Sigma_p^{-1} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{a}} \right)^{-1}, \quad (15)$$

где $\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{a}} = \left(\left(\frac{\partial P_1}{\partial \mathbf{x}_1} \frac{\partial E_1}{\partial \mathbf{x}_g} \frac{\partial E_s}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial S}{\partial \mathbf{a}} \right)^T, \left(\frac{\partial P_2}{\partial \mathbf{x}_2} \frac{\partial E_2}{\partial \mathbf{x}_g} \frac{\partial E_s}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial S}{\partial \mathbf{a}} \right)^T, \dots, \left(\frac{\partial P_N}{\partial \mathbf{x}_N} \frac{\partial E_N}{\partial \mathbf{x}_g} \frac{\partial E_s}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial S}{\partial \mathbf{a}} \right)^T \right)^T$.

Апостериорная матрица ковариации Σ_a оценки параметров положения точки $\hat{\mathbf{a}}$ на поверхности объекта получена для случая, когда калибровка системы проведена без ошибок и преобразования P_i , E_i определены точно. Кроме того, принято, что точно определены ориентация и параметры поверхности, т.е. преобразования E_s и S .

Применим выражения (10)–(15) для определения погрешности измерения стереоскопическим методом координат точек с помощью видеоэндоскопа в соответствии с экспериментом, результаты которого показаны на рис. 1, б. Используем следующие данные: размер приемника излучения $1/10''$ (752×576 пикселей), угловое поле каждой ОЭС 60° , базовое расстояние 3 мм, ось зонда совпадает с осью цилиндра радиусом 20 мм, а объект измерения находится на расстоянии 50 мм от торца зонда. Для иллюстрации вида найденных согласно (11) и (15) матриц ковариации Σ_x оценки трехмерных координат точки в ГСК можно использовать эллипсоид ковариации, главные оси которого определяются собственными векторами и собственными числами матрицы Σ_x . В случае нормального распределения такой эллипсоид ограничивает область пространства, в которой точка \hat{x} лежит с заданной вероятностью [18]. На рис. 5 показан результат расчета погрешности координат точек (эллипсоиды, соответствующие вероятности 90%) для двух рассмотренных алгоритмов триангуляции: классического, используемого в настоящее время (рис. 5, а), и алгоритма, учитывающего принадлежность точки цилиндрической поверхности (рис. 5, б).

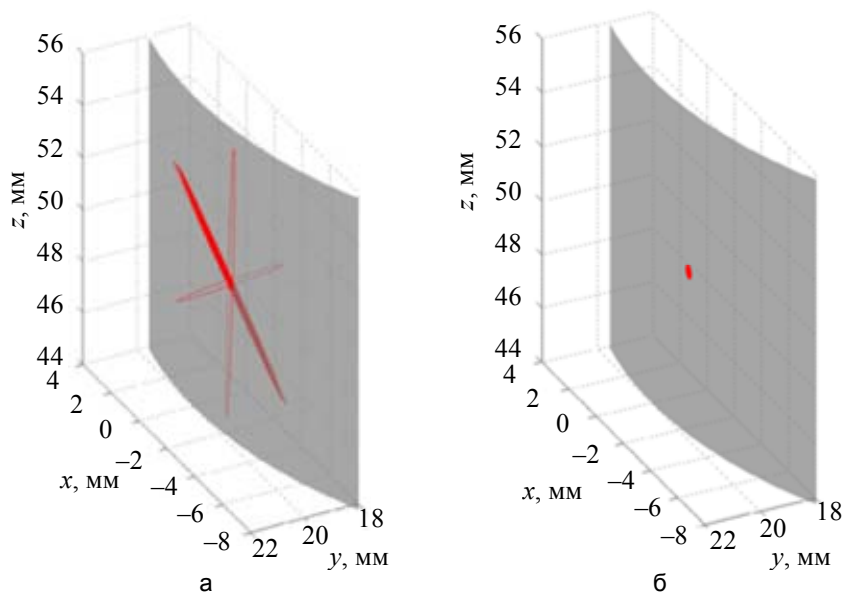


Рис. 5. Иллюстрация погрешности определения трехмерных координат точки \hat{x} для различных алгоритмов триангуляции: классический алгоритм (а); с учетом принадлежности точки цилиндрической поверхности (б)

Для обычного алгоритма триангуляции (алгоритм 1) СКО погрешности измерения координат точек составляет около $\sigma_r = 2,3$ мм в радиальном направлении (вдоль радиус-вектора точки в ГСК) и около $\sigma_t = 0,06$ мм в поперечном направлении. При использовании алгоритма, учитывающего принадлежность точки поверхности, (алгоритм 2) эллипсоид ковариации вырождается в эллипс, лежащий в плоскости, касательной к поверхности цилиндра в рассматриваемой точке (рис. 5, б). При этом СКО погрешности измерения координат точек в данной плоскости составляет около $\sigma_r = 0,12$ мм, т.е. на порядок меньше, чем при классическом алгоритме.

Считая погрешности оценки координат точек \hat{x}^1 , \hat{x}^2 и \hat{x}^3 , задающих на исследуемой поверхности произвольный плоский треугольник площадью $S_{\text{тр}} = \left\| \left(\mathbf{x}^2 - \mathbf{x}^1 \right) \times \left(\mathbf{x}^3 - \mathbf{x}^1 \right) \right\| / 2$, независимыми, получим выражение для определения дисперсии $\sigma_{S_{\text{тр}}}^2$ погрешности вычисления площади этого треугольника:

$$\sigma_{S_{\text{тр}}}^2 = \sum_{j=1,2,3} \frac{\partial S_{\text{тр}}}{\partial x^j} \Sigma_{x^j} \frac{\partial S_{\text{тр}}^T}{\partial x^j} . \quad (16)$$

Для случая, показанного на рис. 1, б, СКО погрешности измерения площади одного треугольника площадью $12,5 \text{ мм}^2$, согласно (16), составляет $\sigma_{S_{\text{тр}}} = 8,3 \text{ мм}^2$ для классического алгоритма триангуляции и $\sigma_{S_{\text{тр}}} = 0,5 \text{ мм}^2$ для алгоритма с учетом принадлежности точек цилиндрической поверхности. Вывод выражения для оценки погрешности измерения площади всей фигуры, указанной на рис. 1, б, аналогичен (16), но более сложен ввиду наличия общих вершин у соседних треугольников. Можно показать, что СКО погрешности измерения площади фигуры в этом случае составляет $\sigma_{S_{\Phi}} = 35,3 \text{ мм}^2$ для

первого и $\sigma_{s_p} = 1,9 \text{ мм}^2$ для второго алгоритмов соответственно. Таким образом, учет принадлежности точек цилиндрической поверхности позволяет значительно снизить погрешность измерения площади.

Заключение

В работе впервые проанализированы основные факторы, определяющие погрешность измерения площади поверхностных дефектов на объектах сложной формы при видеоэндоскопическом контроле. Показано, что интерполяция поверхности набором плоских треугольников, как правило, не является доминирующим фактором. Основная погрешность определяется отсутствием учета принадлежности отдельных точек к поверхности заданной формы. В связи с этим использование априорной информации о форме исследуемой поверхности, которая зачастую доступна из конструкторской документации, могло бы во многих случаях радикально повысить точность измерения площади поверхностных дефектов.

Представленные результаты справедливы для стереоскопического, теневого и фазового методов видеоэндоскопических измерений. Эти результаты могут быть эффективно использованы при разработке новых и модернизации существующих бесконтактных измерительных эндоскопических систем.

Литература

1. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. Неразрушающий контроль и техническая диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
2. Чигорко А.Б., Чигорко А.А. Узлы и системы волоконно-оптических эндоскопов. Томск: ТПУ, 2007. 134 с.
3. Мачихин А.С. Современные технологии визуально-измерительного контроля авиационных двигателей // Двигатель. 2009. № 1. С. 26–28.
4. Мачихин А.С. Измерительные возможности современных видеоэндоскопов // Двигатель. 2009. № 3. С. 8–9.
5. Schick A., Forster F., Stockmann M. 3D measuring in the field of endoscopy // Proc. SPIE, 2011. V. 8082. Art. N 808216.
6. Иванов В.А., Марусина М.Я., Сизиков В.С. Обработка измерительной информации в условиях неопределенностей // Контроль. Диагностика. 2001. № 4. С. 40–43.
7. Hartley R.I., Zisserman A. Multiple View Geometry. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000. 670 p.
8. Марусина М.Я. Инвариантный анализ и синтез в моделях с симметриями. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. 144 с.
9. Kannala J., Heikkilä J., Brandt S.S. Geometric camera calibration / In: Wah B.W. (ed.) Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering. Hoboken, USA: Wiley, 2009. P. 1389–1400.
10. Ramalingam S. Generic Imaging Models: Calibration and 3D Reconstruction Algorithms. Ph. D. thesis. Santa Cruz, USA: Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006. 192 p.
11. Kannala J., Brandt S.S. A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2006. V. 28. N 8. P. 1335–1340.
12. Forsyth D.A., Ponce J. Computer Vision: a Modern Approach. 2nd ed. Upper Saddle River, USA: Prentice-Hall, 2012. 793 p.
13. Zhang Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations // Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision. 1999. V. 1. P. 666–673.
14. Kanatani K. Statistical Optimization for Geometric Computation: Theory and Practice. Mineola, USA: Dover Publications, 2005. 528 p.
15. Волынский Б.А. Сферическая тригонометрия / Под ред. В.В. Клюева. М.: Наука, 1977. 136 с.
16. Zhang Z. Determining the epipolar geometry and its uncertainty: a review // International Journal of Computer Vision. 1998. V. 27. N 2. P. 161–195.
17. Горевой А.В., Колочкин В.Я. Методы оценки погрешности измерения координат в комплексированных системах регистрации трехмерных образов объектов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 9 (21). С. 45.
18. Johnson R.A., Wichern D.W. Applied Multivariate Statistical Analysis. 6th ed. Upper Saddle River, USA: Pearson Prentice Hall, 2007. 773 p.

<i>Горевой Алексей Владимирович</i>	– ассистент, соискатель, МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия, gogevoy.a@gmail.com
<i>Мачихин Александр Сергеевич</i>	– кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия, aalexander@mail.ru
<i>Перфилов Алексей Михайлович</i>	– начальник сектора, ОАО «НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко», Химки, Россия; соискатель, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, windows95@bk.ru

- Alexei V. Gorevoy* – assistant, applicant, Bauman Moscow State Technological University, Moscow, Russia, gorevoy.a@gmail.com
- Alexander S. Machikhin* – PhD, senior scientific researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation RAS, Moscow, Russia, aalexanderr@mail.ru
- Alexei M. Perfilov* – Head of sector, JSC «NPO Energomash named after academician V.P.Glushko», Khimki, Russia; applicant, ITMO University, Saint Petersburg, Russia, windows95@bk.ru

Принято к печати 21.05.14

Accepted 21.05.14