

5. Григорьев С. Н., Козочкин М. П., Сабилов Ф. С., Синопальников В. А. Диагностика технологического оборудования в современном производстве // Технология машиностроения. 2012. № 1. С. 45—50.

6. Kozochkin M. P., Porvatov A. N. Effect of Adhesion Bonds in Friction Contact on Vibroacoustic Signal and Autooscillations // J. Friction Wear. 2014. V. 35. N. 5. P. 389—395.

7. Козочкин М. П., Сабилов Ф. С. Аттракторы при резании и перспективы их использования в диагностике // Измерительная техника. 2009. № 2. С. 37—41.

8. Маслов А. Р., Молодцов В. В. Моделирование колебаний инструментальной системы для растачивания отверстий // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2014. № 4 (31). С. 196—199.

9. Козочкин М. П., Сабилов Ф. С., Порватов А. Н., Боган А. Н. Вибрационный контроль технологического оборудования в производстве // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. № 4 (20). С. 8—14.

10. Козочкин М. П., Сабилов Ф. С. Выявление дефектов шпиндельных узлов виброакустическими методами // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2009. Т. 13. № 1. С. 133—137.

11. Козочкин М. П., Кочинев Н. А., Сабилов Ф. С. Диагностика и мониторинг сложных технологических процессов с помощью измерения виброакустических сигналов // Измерительная техника. 2006. № 7. С. 30—35.

12. Кузовкин В. А., Филатов В. В., Порватов А. Н., Порватова А. Н. Система измерения активной мощности асинхронного двигателя станочного электропривода // Измерительная техника. 2014. № 2. С. 60—62.

13. Исаев А. В., Козочкин М. П., Порватов А. Н. Информационно-измерительная система контроля вибраций при металлообработке // Метрология. 2011. № 8. С. 18—25.

14. Пат. 2478929 РФ. Способ определения износа режущего инструмента / С. Н. Григорьев, М. П. Козочкин, В. В. Филатов, А. Н. Порватов // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 10.

15. Пат. № 2481183 РФ. Устройство автоматизированного контроля нагрузки на валу электродвигателя металлорежущего станка / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов, А. Н. Порватов, Е. А. Соколов, В. А. Камнев // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 13.

Дата принятия 27.05.2015 г.

681.786.4

## Алгоритм быстрого распознавания измерительных маркеров для бесконтактных измерительных систем

С. Г. КОНОВ, А. А. ХОХОЛИКОВ, В. В. СКВОРЦОВА

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,  
Москва, Россия, e-mail: public32@gmail.com

*Рассмотрен алгоритм распознавания измерительных маркеров различного назначения, применяемых в пространственных информационно-измерительных системах. Приведены примеры для использования алгоритма в системах, основанных на технологии фотограмметрии.*

**Ключевые слова:** фотограмметрия, пространственная измерительная система, измерительный маркер, сопряженные точки.

*An algorithm for detecting different measuring markers used for spatial information-measuring systems is considered. The examples of using the algorithm in systems based on photogrammetry technology are presented.*

**Key words:** photogrammetry, three-dimensional measuring system, measuring marker, conjugated dots.

В настоящее время большое количество измерительных задач в машиностроении можно решить с применением бесконтактных измерительных технологий, что повышает актуальность разработки современных пространственных фотограмметрических информационно-измерительных систем (ИИС) [1, 2]. При проектировании таких систем разработчикам приходится решать задачи, для которых в пространстве ИИС требуется выделение отдельных опорных точек [3, 4]. При применении бесконтактных технологий, основанных на фото- и видеокамерах, эти точки часто являются центрами измерительных маркеров, выполняемых в виде геометрических примитивов контрастных цветов. Измерительные

маркеры, как правило, являются фигурой с центральной симметрией, в подавляющем большинстве случаев — кругом черного цвета на белом фоне или со специальными световозвращающими покрытиями для подсветки маркеров [5].

Взаимное расположение маркеров устанавливается при их изготовлении или обеспечивается технологически. При проектировании фотограмметрических информационно-измерительных сканирующих или следящих систем маркеры используют для: калибровки [6, 7], задавая опорные измерительные маркеры с известными координатами; организации процесса слежения за перемещениями объектов в рабочем пространстве ИИС, размещая маркеры на поверх-

ности объекта слежения; объединения результатов исследований поверхностей, проведенных в различных положениях, назначая группу опорных точек в разных системах координат [8].

Погрешность, вносимая при идентификации измерительных маркеров, приводит к дополнительной погрешности измерений, зависящей от координат. Если измерительные маркеры используют при калибровке ИИС, то погрешность определения их координат обусловит неправильное определение параметров камер, а все последующие измерения, применяющие данные параметры, будут содержать погрешность определения измерительных маркеров при калибровке.

При решении задач сканирования и слежения [9] в фотографии координаты центров измерительных маркеров получают в системе координат каждой из камер, затем на их основе с учетом калибровочных коэффициентов вычисляют необходимые пространственные координаты. Таким образом, при использовании камер в качестве чувствительных элементов основной задачей является определение координат центра опорного маркера в двумерном изображении.

Теория машинного зрения располагает значительным арсеналом математических средств для обнаружения объектов известной формы на изображениях [10], среди которых и корреляционный анализ, и применение специальных фильтров, однако лишь немногие удовлетворяют важнейшим критериям для ИИС, таким как высокая точность определения координат центра маркера, высокая производительность алгоритма, т. е. способность находить сотни точек в секунду, отсутствие искажений в информации при ее обработке.

Изображение круглого измерительного маркера является дискретизованным в пространстве и по уровню и представляет матрицу, содержащую значения яркостей соответствующих пикселей, при этом номера пикселей — это координаты в пространстве изображения. Изображение, получаемое камерой без дополнительной обработки, имеет ряд особенностей: черный цвет маркера содержит фоновый шум, наводимый ПЗС-матрицей; контрастность требует доработки, так как не все фоновые пиксели белые; граница между маркером и фоном размыта.

При работе с подобными изображениями обработку целесообразно проводить в два этапа: приблизительно определить ориентировочные координаты центров маркеров на изображении; уточнить эти координаты. На первом этапе к изображению применяют специальный нормализующий фильтр, затем проводят его бинаризацию и упрощенный корреляционный анализ. Нормализующий фильтр [11, 12] необходим для преобразования яркости каждого пиксела, которое проводят в соответствии с выражением для 8-разрядных изображений:

$$y = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq x < a; \\ \frac{255x}{b-a} - \frac{255a}{b-a}, & \text{если } a \leq x < b; \\ 255, & \text{если } b < x \leq 255, \end{cases}$$

где  $x, y$  — яркость пикселей до и после нормализации, соответственно;  $a, b$  — нижний и верхний пороги нормализации, соответственно; при этом 0 соответствует черному цвету, а 255 — белому.

После нормализации в изображении значительно снижается уровень шума вблизи значений, соответствующих черному и белому цвету, при этом характер распределения яркости на граничных переходах не меняется, так как преобразование линейное. После этого для ускорения поиска нескольких маркеров на одном изображении его бинаризуют в соответствии с условием

$$y = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq x < c; \\ 1, & \text{если } c < x \leq 255, \end{cases}$$

где  $c$  — порог бинаризации.

Полученная бинарная матрица является битовым полем, что позволяет значительно сократить ресурсы системы, выделяемые для хранения и обработки изображения в дальнейшем. В битовом поле определенные элементы можно найти методом упрощенного корреляционного анализа, для которого необходимо создать эталонное изображение искомого объекта в форме бинарной матрицы, а затем вычислить число совпадений значений соответствующих элементов для всех возможных взаимных расположений эталонной и исследуемой матриц. Для расчетов надо воспользоваться следующим выражением, основанным на операции побитового исключения:

$$z_{k,l} = \frac{1}{n} \left[ n - \sum_{i,j} (A_{i,j} \oplus B_{k+i, l+j}) \right],$$

где  $z_{k,l}$  — упрощенный коэффициент корреляции эталона с элементом изображения, верхний левый угол которого расположен в  $k$ -й строке и  $l$ -м столбце;  $n$  — количество элементов в матрице-эталоне;  $i, j$  — строки и столбцы эталона, соответственно;  $A$  — матрица-эталон;  $B$  — бинарное изображение.

Полученный набор коэффициентов  $z_{k,l}$  образует матрицу, которая сводит поиск элемента, похожего на эталон, к процессу нахождения наибольших значений. Анализ такой матрицы позволяет выявить участки, похожие на искомый фрагмент, и получить первое приближение их координат в пространстве изображения. После нахождения координат первого приближения, можно уточнить координаты центра измерительного маркера, вычислив координаты центра масс на исходном изображении в окрестностях координат первого приближения. Для случая с черным маркером на белом фоне координаты центра масс рассчитывают по формулам

$$x_{\text{ц}} = \sum_j \left[ j \sum_i (255 - C_{i,j}) \right] / \sum_{i,j} (255 - C_{i,j});$$

$$y_{\text{ц}} = \sum_i \left[ i \sum_j (255 - C_{i,j}) \right] / \sum_{i,j} (255 - C_{i,j}),$$

где  $C_{i,j}$  — яркость пиксела, расположенного в  $i$ -й строке  $j$ -го столбца исходного изображения;  $x_{\text{ц}}, y_{\text{ц}}$  — координаты центра масс сегмента изображения, принимаемые за координаты центра измерительного маркера.

Основными достоинствами приведенного алгоритма являются:

высокая производительность ввиду отсутствия сложных в реализации математических операций;

более точная оценка координат центра измерительного маркера, так как измерительная информация подвергается искажениям только при вычислениях и только в первом приближении;

гибкость и возможность реализации поиска измерительных маркеров различных форм.

Описанный алгоритм идентификации измерительных маркеров был опробован в работе макета пространственной фотограмметрической ИИС, разработанного в МГТУ «СТАНКИН». Алгоритм показал повышение эффективности распознавания координат центров измерительных маркеров по сравнению с классическим корреляционным анализом по таким параметрам как снижение погрешности распознавания координат центров маркеров на 0,02—0,1 мм и повышение скорости обработки в 6—10 раз в зависимости от производительности вычислительной машины. Продолжение исследований в данном направлении способно обеспечить повышение эффективности существующих технологических и измерительных процессов в машиностроении [13].

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (грант № 9.2545.2014/К, соглашение № 14.593.21.0004 от 04.12.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI59314X0004).

#### Л и т е р а т у р а

1. Григорьев С. Н., Конов С. Г. Развитие пространственной метрологии для обеспечения контроля сложных поверхностей в машиностроении // Контроль. Диагностика. 2012. № 12. С. 9—13.

2. Смулов И. Ю., Мовчан И. А., Ядройцев И. А., Окунькова А. А., Конов С. Г., Антоненкова Г. В. Экспериментальное аддитивное прямое производство с помощью лазера // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. № 2. С. 48—50.

3. Телешевский В. И., Жирнов И. В., Дубенская М. А., Конов С. Г. Бесконтактное измерение температуры на поверхности материала INOX 304 L в зоне лазерного воздействия // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2013. № 4 (27). С. 61—64.

4. Досько С. И., Крутов А. В., Конов С. Г., Гришин Д. А., Гололобова А. А. Экспериментальная оценка и сравнительный анализ диссипативных свойств шариковых направляющих качения модульного типа // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2014. № 1 (28). С. 63—70.

5. Марков Б. Н., Конов С. Г., Логинов А. А. Калибровка камер фотограмметрических измерительных систем с использованием генетического алгоритма поиска решения // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 44—46.

6. Конов С. Г., Гололобова А. А. Калибровка камер фотограмметрических измерительных систем на базе метода наименьших квадратов // Метрология. 2014. № 5. С. 15—20.

7. Конов С. Г., Марков Б. Н. Алгоритм коррекции погрешности от перспективных искажений изображений измерительных меток // Метрология. 2011. № 3. С. 8—15.

8. Конов С. Г. Разработка координатно-измерительной машины контактного типа на базе фотограмметрической системы // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2010. № 2. С. 119—121.

9. Конов С. Г., Логинов А. А., Крутов А. В. Система слежения за пространственными перемещениями подвижных узлов станков и робототехники // Измерительная техника. 2012. № 2. С. 10—12.

10. Конов С. Г., Крутов А. В. Разработка системы слежения за пространственными перемещениями объектов на базе технологии фотограмметрии // Метрология. 2013. № 12. С. 10—15.

11. Телешевский В. И., Шулепов А. В., Роздина Е. М. Повышение точности измерений линейно-угловых размеров изделий в интеллектуальной компьютерной микроскопии // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. № 4. С. 35—38.

12. Телешевский В. И., Шулепов А. В., Есин А. П. Методы повышения точности линейных измерений на измерительных микроскопах с помощью цифровой обработки оптических изображений // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2009. № 1. С. 102—107.

13. Телешевский В. И., Глубоков А. В. Компьютеризированная измерительная информационная система для контроля отклонений от плоскостности на базе электронных уровней // Измерительная техника. 2004. № 11. С. 15—18.

Дата принятия 27.05.2015 г.