РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
АВТОМЕТРИЯ
2008, том 44, № 5

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 621.391

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛЯ НАПРАВЛЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

И. С. Грузман, В. Б. Карпушин

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск
E-mail: gruzman@ktor.ref.nstu.ru

Получен алгоритм оценивания параметров и коррекции геометрических искажений при неизвестном фокусном расстоянии. Найдено соотношение, устанавливающее связь между полем направлений и значениями параметров геометрических искажений, применение которого позволяет преобразовывать изображения прямолинейных царапин в горизонтальные линии. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие возможность использования поля направлений для решения задачи коррекции геометрических искажений изображений, полученных при проведении трасологических или баллистических исследований.

Введение. При проведении трасологических и баллистических исследований изучаются следы в целях установления оставившего их объекта. Следы скольжения, оставленные инструментами, и следы на пулях от канала ствола как гладкоствольного, так и нарезного оружия представляют собой практически прямолинейные царапины (трассы). Ширина трасс и расстояние между ними отображают индивидуальные особенности следообразующих объектов [1]. Для автоматизации исследований все шире используются методы анализа изображений следов, полученных с помощью микроскопа и цифровой фотокамеры [2, 3]. Микроскоп обеспечивает возможность изучения следов при больших увеличениях со значительной глубиной резкости, а цифровой фотоаппарат – регистрацию и ввод изображений в компьютер. В настоящее время все чаще применяются электронные микроскопы. Далее систему «цифровой фотоаппарат–микроскоп» будем называть цифровой камерой.

Обычно процедура идентификации объектов состоит в сравнении одномерных сигналов, полученных путем усреднения отсчетов яркости изображений вдоль трасс и представляющих собой оценки рельефа режущих кромок исследуемых объектов [3, 4]. При регистрации микроизображений даже небольшие нарушения перпендикулярности оптической оси объектива к поверхности исследуемого объекта или к матрице цифровой камеры приводят к возникновению геометрических искажений, которые проявляются в том, что практически параллельные прямолинейные трассы на наблюдаемом изображении образуют веер. Это, в свою очередь, приводит к существенным искажениям формы сравниваемых одномерных сигналов. Кроме того, для удобства реализации алгоритмов оценивания рельефа режущей кромки желательно, чтобы трассы были вертикальными или горизонтальными. В этом случае усреднение будет выполняться путем суммирования отсчетов столбцов или строк изображения.

Для оценки параметров и коррекции геометрических искажений обычно используются сопряженные точки на совмещаемых изображениях [5]. Однако на микроизображениях следов обычно не удается идентифицировать сопряженные точки традиционными методами.

Цель данной работы – получить алгоритм оценивания параметров и коррекции геометрических искажений на основе поля направлений для преобразования трасс в горизонтальные линии.

Алгоритм оценивания параметров и коррекции геометрических искажений. Полем направлений называется поле углов преимущественного направления линий в локальной окрестности точки изображения [6]. Тангенс значения поля направления в точке изображения равен тангенсу угла наклона k прямолинейных трасс, проходящих в окрестности данной точки. Установим связь между параметрами геометрических искажений и тангенсом угла наклона трасс.

В общем случае связь между однородными координатами $[X, Y, Z]^T$ исходного изображения Λ с горизонтальными линиями и однородными координатами $[X', Y', Z']$ наблюдаемого изображения Λ' определяется проективным преобразованием

$$[X', Y', Z']^T = A[X, Y, Z]^T, \tag{1}$$

где $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \notin \mathbb{R}^{3\times 3}$ – матрица преобразования, T – символ транспонирования. Проективное преобразование взаимно однозначно, если $\det A \neq 0$ [7]. Связь между декартовыми координатами соответствующих точек на плоскости с учетом (1) имеет вид

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{X'}{Y'} \\ \dfrac{Y'}{Z'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{a_{11}x + a_{12}y + a_{13}}{a_{31}x + a_{32}y + a_{33}} \\ \dfrac{a_{21}x + a_{22}y + a_{23}}{a_{31}x + a_{32}y + a_{33}} \end{bmatrix}, \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{X}{Z} \\ \dfrac{Y}{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{b_{11}x' + b_{12}y' + b_{13}}{b_{31}x' + b_{32}y' + b_{33}} \\ \dfrac{b_{21}x' + b_{22}y' + b_{23}}{b_{31}x' + b_{32}y' + b_{33}} \end{bmatrix}, \tag{3}$$

где

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} = A^{-1}. \tag{4}$$

Для двух горизонтально расположенных точек $[x_1, y_1]^T$ и $[x_2, y_2]^T$ на исходном изображении $y_1 = y_2$. Тогда тангенс угла наклона прямой линии на наблюдаемом изображении с учетом (2) найдем из уравнения

$$k = \frac{y'_2 - y'_1}{x'_2 - x'_1} = \frac{(a_{23}a_{31} - a_{21}a_{33}) + (a_{22}a_{31} - a_{21}a_{32})\,y_1}{(a_{13}a_{31} - a_{11}a_{33}) + (a_{12}a_{31} - a_{11}a_{32})\,y_1}. \tag{5}$$

Подставив (3) в выражение (5) и проведя несложные алгебраические преобразования, с учетом (4) получим

$$k(x'_1, y'_1) = \frac{a_{21} - a_{31}\,y'_1}{a_{11} - a_{31}\,x'_1}. \tag{6}$$

Из (6) следует, что тангенс угла наклона $k(x'_1, y'_1)$ или тангенс поля направлений в точке с координатами $[x'_1, y'_1]^T$ изображения Λ' полностью определяется значениями коэффициентов a_{11}, a_{21} и a_{31} матрицы преобразования A. Очевидно, что эти коэффициенты являются зависимыми. Чтобы установить связь между коэффициентами a_{11}, a_{21} и a_{31}, а также связь между этими и остальными коэффициентами матрицы A, далее будем полагать, что A является матрицей вращения, удовлетворяющей следующим условиям [8]:

$$\det A = 1, \quad A^{-1} = A^T. \tag{7}$$

В частности, для матрицы вращения сумма квадратов коэффициентов a_{11}, a_{21} и a_{31} равна единице. Совместная оценка коэффициентов a_{11}, a_{21} и a_{31} может быть найдена методом наименьших квадратов:

$$(\tilde{a}_{21}, \tilde{a}_{31}) = \arg\min_{a_{21},\, a_{31}} Q(a_{21}, a_{31}),$$

где целевая функция

$$Q(a_{21}, a_{31}) = \frac{1}{n_{x'} n_{y'}} \sum_{x'=1}^{n_{x'}} \sum_{y'=1}^{n_{y'}} \left(\tilde{k}(x', y') - \frac{a_{21} - a_{31}\,y'}{\sqrt{1 - a_{21}^2 - a_{31}^2} - a_{31}\,x'} \right)^2, \tag{8}$$

$$a_{11} = \sqrt{1 - a_{21}^2 - a_{31}^2}, \tag{9}$$

$\tilde{k}(x', y')$ – оценка поля направлений наблюдаемого изображения, полученная, например, с помощью алгоритма на основе спектральных моментов [9,

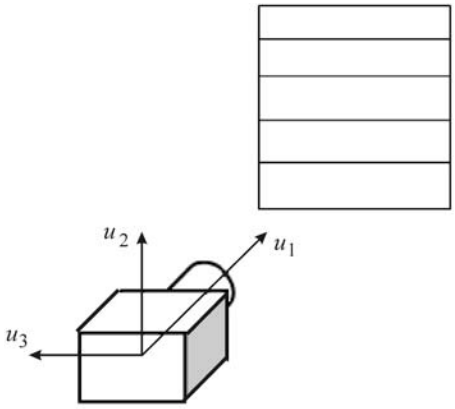

Рис. 1

10]; $n_{x'} \times n_{y'}$ – размер наблюдаемого изображения Λ'. В (9) учтено, что при малых углах поворота $a_{11} > 0$. Это ограничение соответствует реальным условиям формирования изображений.

Вращение вокруг каждой из осей u_1, u_2 и u_3 на углы γ, φ, θ (рис. 1) представляется соответствующими матрицами преобразования [11]:

$$A_1(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_2(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix}, \qquad A_3(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}.$$

Матрица, описывающая вращение в трехмерном евклидовом пространстве, может быть представлена шестью способами в виде произведения матриц вращений $A_1(\gamma), A_2(\varphi)$ и $A_3(\theta)$ [11]. Очевидно, что наиболее простой результат дадут те способы, в которых сначала выполняется вращение вокруг оси u_3, так как при этом горизонтальные линии остаются горизонтальными (меняется только расстояние между ними). Этот факт выражается в том, что коэффициенты a_{11}, a_{21} и a_{31} в матрицах вращения $A^{(1)} = A_1(\gamma)A_2(\varphi)A_3(\theta)$ или $A^{(2)} = A_2(\varphi)A_1(\gamma)A_3(\theta)$ не зависят от угла θ. Следовательно, его можно принять произвольным и, в частности, равным нулю. В этом случае

$$A^{(1)} = A_1(\gamma)A_2(\varphi), \tag{10}$$

$$A^{(2)} = A_2(\varphi)A_1(\gamma). \tag{11}$$

С учетом условия (7) все коэффициенты матриц (10) и (11) могут быть выражены через коэффициенты a_{21} и a_{31}:

$$A^{(1)} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-a_{21}^2-a_{31}^2} & -\dfrac{a_{21}}{\sqrt{1-a_{31}^2}} & -a_{31}\sqrt{\dfrac{1-a_{21}^2-a_{31}^2}{1-a_{31}^2}} \\ a_{21} & \sqrt{\dfrac{1-a_{21}^2-a_{31}^2}{1-a_{31}^2}} & -\dfrac{a_{21}a_{31}}{\sqrt{1-a_{31}^2}} \\ a_{31} & 0 & \sqrt{1-a_{31}^2} \end{bmatrix}, \tag{12}$$

$$A^{(2)} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-a_{21}^2-a_{31}^2} & -a_{21}\sqrt{\dfrac{1-a_{21}^2-a_{31}^2}{1-a_{21}^2}} & -\dfrac{a_{31}}{\sqrt{1-a_{21}^2}} \\ a_{21} & \sqrt{1-a_{21}^2} & 0 \\ a_{31} & -\dfrac{a_{21}a_{31}}{\sqrt{1-a_{21}^2}} & \sqrt{\dfrac{1-a_{21}^2-a_{31}^2}{1-a_{21}^2}} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Здесь также учтено, что при малых углах поворота значения диагональных коэффициентов матриц вращения больше нуля.

Следует подчеркнуть, что в матрицах $A^{(1)}$ и $A^{(2)}$ коэффициенты a_{11}, a_{21} и a_{31}, определяющие связь между тангенсом поля направлений и координатами $[x',\ y']^T$ наблюдаемого изображения Λ', одни и те же. Поэтому с точки зрения преобразования трасс в горизонтальные линии эти матрицы вращения эквивалентны. Различие остальных коэффициентов определяется порядком вращения системы координат вокруг осей u_1 и u_2.

Таким образом, алгоритм преобразования прямолинейных трасс в горизонтальные линии состоит в следующем. По наблюдаемому изображению Λ' вычисляется оценка поля направлений $\widetilde{k}(x',\ y')$, $x' = \overline{1, n_{x'}}$, $y' = \overline{1, n_{y'}}$. Далее находятся оценки коэффициентов a_{21} и a_{31} путем минимизации целевой функции (8). Затем по формулам (12) или (13) вычисляются остальные коэффициенты матрицы вращения и по формуле (3) выполняется геометрическое преобразование наблюдаемого изображения Λ'. В результате получим скорректированное изображение $\widetilde{\Lambda}$, на котором горизонтальность линий определяется точностью оценки коэффициентов a_{21} и a_{31}.

Для реальных изображений количественная оценка качества компенсации геометрических искажений может быть выполнена только косвенно, например путем вычисления коэффициента взаимной корреляции между столбцами скорректированного изображения, находящимися на расстоянии Δ друг от друга:

$$R = \frac{\dfrac{1}{n_y}\sum\limits_{y=1}^{n_y}\widetilde{\Lambda}(x,\ y)\widetilde{\Lambda}(x+\Delta,\ y) - \dfrac{1}{n_y}\sum\limits_{y=1}^{n_y}\widetilde{\Lambda}(x,\ y)\dfrac{1}{n_y}\sum\limits_{y=1}^{n_y}\widetilde{\Lambda}(x+\Delta,\ y)}{\left(\dfrac{1}{n_y}\sum\limits_{y=1}^{n_y}\widetilde{\Lambda}^2(x,\ y) - \left(\dfrac{1}{n_y}\sum\limits_{y=1}^{n_y}\widetilde{\Lambda}(x,\ y)\right)^2\right)^{1/2} \times} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\frac{1}{n_y}\sum_{y=1}^{n_y}\tilde{\Lambda}(x,\ y)\tilde{\Lambda}(x+\Delta,\ y) - \frac{1}{n_y}\sum_{y=1}^{n_y}\tilde{\Lambda}(x,\ y)\frac{1}{n_y}\sum_{y=1}^{n_y}\tilde{\Lambda}(x+\Delta,\ y)}{\times\left(\frac{1}{n_y}\sum_{y=1}^{n_y}\tilde{\Lambda}^2(x+\Delta,\ y) - \left(\frac{1}{n_y}\sum_{y=1}^{n_y}\tilde{\Lambda}(x+\Delta,\ y)\right)^2\right)^{1/2}}, \qquad (14)$$

где x – номер столбца, y – номер строки. Чем ближе значение R к единице при фиксированном значении Δ, тем лучше скорректированы геометрические искажения.

Для практического применения алгоритма представляет интерес анализ точности оценки углов поворота цифровой камеры, проведенный, например, методом математического моделирования. Для этого необходимо задать фокусное расстояние объектива и порядок вращения камеры вокруг каждой из осей u_1, u_2 и u_3.

Оценивание углов поворота γ и φ при известном фокусном расстоянии. Пусть изображения Λ и Λ' получены одной и той же цифровой камерой с фокусным расстоянием f при неподвижном оптическом центре. В этом случае связь между трехмерной системой координат камеры и координатами изображения определяется выражениями [8]

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f\,\frac{X}{Z} \\ f\,\frac{Y}{Z} \end{bmatrix}$$

для изображения Λ с горизонтальными трассами и

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f\,\frac{X'}{Z'} \\ f\,\frac{Y'}{Z'} \end{bmatrix}$$

для геометрически искаженного изображения Λ'.

Переход от трехмерной прямоугольной декартовой системы координат $[X, Y, Z]^T$, в которой получено изображение Λ, к системе координат $[X',\ Y',\ Z']^T$, в которой получено изображение Λ', осуществляется путем последовательного вращения вокруг осей u_3, u_2 и u_1:

$$[X',\ Y',\ Z']^T = A_1(\gamma)A_2(\varphi)A_3(\theta)[X, Y, Z]^T = A[X, Y, Z]^T.$$

В этом случае уравнение (6) имеет вид

$$k(x',\ y') = \frac{-f\sin\gamma + y'\,\mathrm{tg}\varphi}{f\cos\gamma + x'\,\mathrm{tg}\varphi}.$$

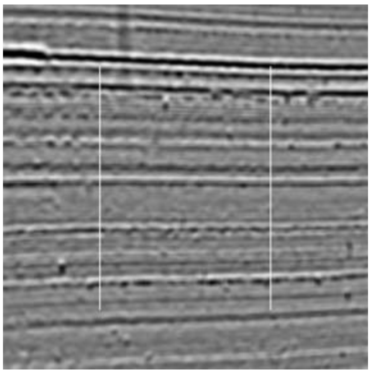

Рис. 2

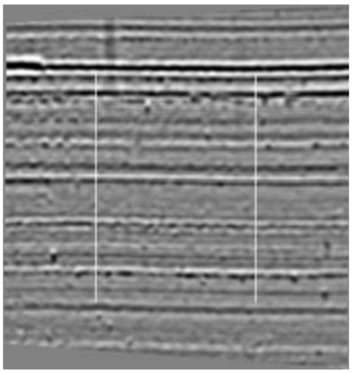

Рис. 3

Как и следовало ожидать, для указанной последовательности вращения системы координат тангенс угла наклона $k(x', y')$ не зависит от угла θ. Совместная оценка углов поворота γ и φ, так же как и коэффициентов a_{21} и a_{31}, может быть найдена методом наименьших квадратов:

$$(\widetilde{\gamma}, \widetilde{\varphi}) = \arg\min_{\gamma,\varphi} J(\gamma, \varphi), \tag{15}$$

где целевая функция

$$J(\gamma, \varphi) = \frac{1}{n_{x'} n_{y'}} \sum_{x'=1}^{n_{x'}} \sum_{y'=1}^{n_{y'}} \left(\widetilde{k}(x', y') - \frac{-f \sin\gamma + y' \operatorname{tg}\varphi}{f \cos\gamma + x' \operatorname{tg}\varphi} \right)^2. \tag{16}$$

Результаты экспериментальных исследований. Изображение, полученное с помощью цифровой камеры, показано на рис. 2. Результат коррекции его геометрических искажений приведен на рис. 3, при этом коэффициент взаимной корреляции столбцов (14), расположенных на расстоянии $\Delta = 200$ пикселей друг от друга и отмеченных на рисунках белыми линиями, возрос с 0,33 до 0,85.

Анализ эффективности алгоритмов коррекции геометрических искажений и оценивания углов γ и φ проводился методом компьютерного моделирования на тестовом изображении (рис. 4). Столбцы тестового изображения представляют собой одну и ту же реализацию гауссовского случайного процесса с дисперсией D_Λ и интервалом корреляции 3,5 пикселя. Для оценки помехоустойчивости алгоритмов к тестовому изображению добавлялся аддитивный белый шум с дисперсией D_η. Анализ проводился для двух вариантов при одном и том же фокусном расстоянии $f = 100$. В первом варианте $\varphi = 3°$, $\gamma = 1°$, $\theta = 2°$, во втором варианте $\gamma = \varphi = \theta = 5°$.

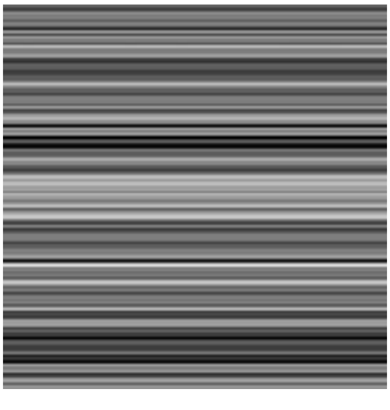

Рис. 4

Суть первого эксперимента заключалась в следующем. Тестовое изобра-

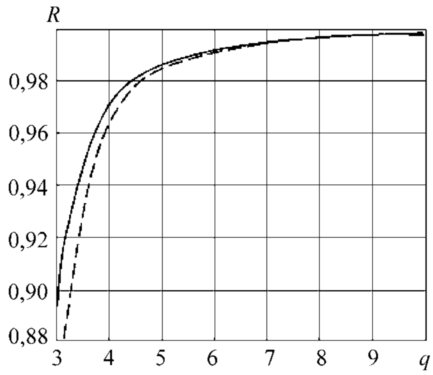

Рис. 5

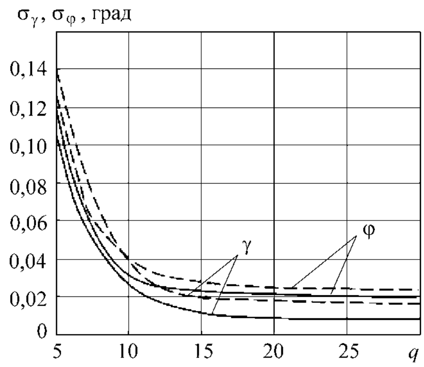

Рис. 6

жение подвергалось геометрическим искажениям. Затем добавлялся аддитивный шум и вычислялись оценки коэффициентов a_{21}, a_{31} и матрицы вращения при неизвестном фокусном расстоянии. Полученная матрица вращения использовалась для коррекции геометрических искажений. Чтобы коэффициент взаимной корреляции R отражал только качество коррекции геометрических искажений и не зависел от дисперсии аддитивного шума, он вычислялся для искаженного и скорректированного изображений при отсутствии шума. На рис. 5 показаны зависимости коэффициента взаимной корреляции столбцов скорректированного изображения от отношения сигнал/шум $q = \sqrt{D_s / D_\eta}$ при $\Delta = 200$, где сплошная линия – первый вариант, а штриховая – второй. Коэффициент R для искаженных изображений равнялся 0,41 и 0,34 соответственно.

Второй эксперимент – это анализ точности оценивания углов поворота камеры γ и φ при известном фокусном расстоянии с помощью алгоритма (15), (16). На рис. 6 приведены зависимости

$$\sigma_\gamma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\gamma - \tilde{\gamma}_i)^2}, \qquad \sigma_\varphi = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\varphi - \tilde{\varphi}_i)^2}$$

от отношения сигнал/шум q, где $N = 500$ – количество повторений эксперимента; $\tilde{\gamma}_i$ и $\tilde{\varphi}_i$, $i = \overline{1, N}$, – оценки углов γ и φ. Здесь также сплошные линии соответствуют первому варианту, а штриховые – второму.

Заключение. Экспериментальные исследования в предлагаемой работе показали, что поле направлений может успешно использоваться для коррекции геометрических искажений и преобразования прямолинейных трасс в горизонтальные линии даже при отсутствии данных о фокусном расстоянии. Для отношений сигнал/шум $q > 5$ коэффициент взаимной корреляции столбцов скорректированного изображения превышает 0,98, а среднеквадратическое отклонение ошибки углов поворота камеры меньше 0,15°. Коррекция геометрических искажений реального изображения обеспечила увеличение коэффициента корреляции столбцов более чем в 2,5 раза, что должно существенно повысить качество оценки рельефа режущих кромок анализируемых объектов и вероятность правильного распознавания изображений при проведении трасологических и баллистических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аверьянова Т. В., Белкин Р. С., Корухов Ю. Г., Россинская Е. Р.** Криминалистика: Учебник для вузов /Под ред. Р. С. Белкина. М.: Изд. группа «НОРМА-ИНФРА•М», 2007.
2. **Пантелеев В. Г., Егорова О. В., Клыкова Е. И.** Компьютерная микроскопия. М.: Техносфера, 2005.
3. **Heizmann M., Puente L. F.** Automated analysis and comparison of striated toolmarks // Proc. of the Fourth European Meeting for Shoeprint/Toolmark Examiners (SPTM 2001) /Eds. H. Katterwe and A. Körschgen. Wiesbaden: BKA, 2001. P. 121.
4. **Heizmann M.** Strategies for the automated recognition of marks in forensic science // Proc. of the Intern. Symp. on Law Enforcement Technologies. Orlando, Florida, USA, 2002. P. 68.
5. **Хорн Б. К. П.** Зрение роботов. М.: Мир, 1989.
6. **Методы** компьютерной обработки изображений /Под ред. В. А. Сойфера. М.: Физматлит, 2003.
7. **Юнг Дж. В.** Проективная геометрия. М.: ИЛ, 1949.
8. **Форсайт Д., Понс Ж.** Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Издательский дом «Вильямс», 2004.
9. **Грузман И. С., Новиков К. В.** Сегментация анизотропных изображений на основе локальных спектральных характеристик // Автометрия. 2004. **40**, № 4. С. 26.
10. **Грузман И. С., Новиков К. В.** Быстрый алгоритм сегментации анизотропных изображений на основе локальных спектральных моментов // Изв. вузов России. Сер. Радиоэлектроника. 2005. № 3. С. 50.
11. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1978.

Поступила в редакцию 28 ноября 2007 г.