

## АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 621.391

### ОЦЕНКА ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ СЛЕДООБРАЗУЮЩЕГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ГРАДИЕНТНОГО СТРУКТУРНОГО ТЕНЗОРА

**И. С. Грузман, В. Б. Карпушин**

*Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Новосибирский государственный технический университет»,  
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20  
E-mail: isguzman@gmail.com*

Получен алгоритм оценивания траектории движения следообразующего объекта, не требующий выделения области следов в интерактивном режиме. Предложена адекватная мера прямолинейности следов, позволяющая количественно оценивать эффективность работы алгоритмов оценивания. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие возможность использования градиентного структурного тензора для решения задач оценивания траектории движения объектов по изображениям, получаемым при проведении трасологических исследований.

*Ключевые слова:* градиентный структурный тензор, следообразующий объект, выпрямление линий, трасология.

**Введение.** Особенности рельефа следообразующей кромки объекта являются одним из основных идентификационных признаков в трасологии. При движении объекта относительно следовоспринимающей поверхности каждая выступающая деталь рельефа образует бороздку, а каждое углубление — валик на данной поверхности, т. е. характерные точки рельефа отображаются в виде совокупности линий (трасс). Чтобы обеспечить высокую помехоустойчивость алгоритмов идентификации, используется оценка следообразующей кромки рельефа, полученная путём усреднения отсчётов яркости изображений вдоль линий следа [1, 2]. Это позволяет свести задачу идентификации к сравнению одномерных сигналов (сигнатур), например, на основе вычисления взаимной корреляционной функции [2].

При прямолинейном движении следообразующего объекта следы представляют собой совокупность практически прямых линий. Вычисление сигнатуры выполняется путём суммирования отсчётов столбцов или строк изображения [1, 2]. Для этого анализируемое изображение поворачивается так, чтобы трассы были вертикальными или горизонтальными.

Задача вычисления сигнатуры значительно усложняется, если объект движется по криволинейной траектории или деформированной следовоспринимающей поверхности [3–5]. Для решения задачи выпрямления трасс в [3] рассмотрены различной сложности модели движения следообразующего объекта. В [4, 5] отмечено, что в большинстве практических случаев может быть использована модель движения на основе чистого смещения (рис. 1). Например, при движении объекта слева направо происходит случайное вертикальное смещение следообразующей кромки. В этом случае для оценки траектории движения предложено использовать корреляционный алгоритм [3–5], в соответствии с которым оценка сдвига  $j_2$ -го столбца относительно  $i_2$ -го столбца анализируемого дискретного изображения

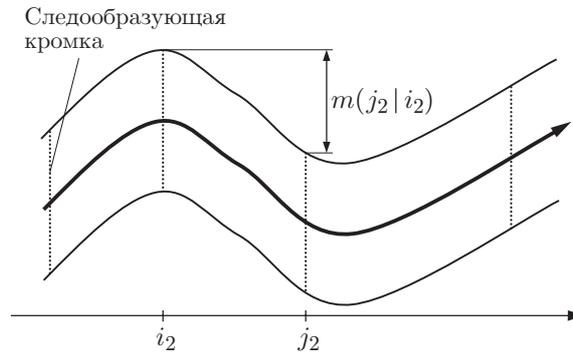


Рис. 1

$Z = \{z(i_1, i_2), i_1 = \overline{1, N}, i_2 = \overline{1, N}\}$  имеет вид

$$\tilde{m}(j_2 | i_2) = \arg \max_m K_{j_2, i_2}(m), \quad (1)$$

где  $K_{j_2, i_2}(m)$  — нормированная взаимная корреляционная функция (НВКФ) этих столбцов. Здесь и далее переменные с нижним индексом 1 обозначают номер строки, а с индексом 2 — номер столбца дискретного изображения.

Несмотря на то что алгоритм (1) обладает достаточно высокой вычислительной эффективностью и обеспечивает хорошую точность оценивания траектории движения, у него есть ряд существенных недостатков. Во-первых, для успешной работы алгоритма необходимо на изображении в интерактивном режиме выделить область следов и отсечь область фона [3–5]. Во-вторых, частичное пропадание следов, обусловленное неровностью следовоспринимающей поверхности, приводит к смещению максимума НВКФ.

В большинстве практических случаев изображения линий следов даже при криволинейной траектории движения объекта обладают локальной линейной симметрией (ЛС) [6], т. е. в локальной области достаточно малых размеров изолинии двумерной функции яркости являются практически параллельными линиями. Для анализа изображений с ЛС широко используются алгоритмы на основе градиентного структурного тензора (ГСТ) [6, 7], способные определять доминирующее направление линий в локальной окрестности точки изображения и отличать анизотропные области, содержащие линии, от изотропных областей, представляющих собой неинформативный фон.

Цель данной работы — получить алгоритм оценивания траектории движения и выпрямления линий следов объекта на основе ГСТ, не требующий выделения информативной области в интерактивном режиме.

**Применение ГСТ для оценки траектории движения следообразующего объекта.** Информативной областью анализируемого изображения является область следов, представляющая собой анизотропную текстуру, которая обладает сильно выраженными анизотропными свойствами, обусловленными локальной ЛС. Кроме того, изображение содержит царапины следовоспринимающей поверхности, направление которых не совпадает с направлением движения следообразующего объекта, а также фон с изотропной или слабо выраженной анизотропной текстурой с хаотическим направлением.

Для конкретности далее будем полагать, что на анализируемом изображении наблюдаются следы с горизонтальным доминирующим направлением и случайным вертикальным смещением следообразующей кромки. В общем случае оценка доминирующего угла наклона трасс может быть получена с помощью алгоритмов оценивания и коррекции геометрических искажений на основе ГСТ (например, [8, 9]) с последующим поворотом ана-

лизируемого изображения таким образом, чтобы доминирующее направление линий стало горизонтальным.

ГСТ  $J(i_1, i_2)$  изображения  $Z$  в точке с координатами  $(i_1, i_2)$  представляет собой вещественную симметричную матрицу (размера  $2 \times 2$ ) [6, 7]

$$J(i_1, i_2) = \begin{bmatrix} J_{11}(i_1, i_2) & J_{12}(i_1, i_2) \\ J_{12}(i_1, i_2) & J_{22}(i_1, i_2) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где

$$J_{11}(i_1, i_2) = \frac{1}{(2W+1)^2} \sum_{j_1=-W}^W \sum_{j_2=-W}^W \tilde{G}_1^2(i_1 + j_1, i_2 + j_2); \quad (3)$$

$$J_{22}(i_1, i_2) = \frac{1}{(2W+1)^2} \sum_{j_1=-W}^W \sum_{j_2=-W}^W \tilde{G}_2^2(i_1 + j_1, i_2 + j_2); \quad (4)$$

$$J_{12}(i_1, i_2) = \frac{1}{(2W+1)^2} \sum_{j_1=-W}^W \sum_{j_2=-W}^W \tilde{G}_1(i_1 + j_1, i_2 + j_2) \tilde{G}_2(i_1 + j_1, i_2 + j_2); \quad (5)$$

$\tilde{G}_1(\cdot)$ ,  $\tilde{G}_2(\cdot)$  — производные вдоль строк и столбцов изображения  $Z$ , вычисленные, например, с помощью масочных дифференцирующих фильтров [7, 10];  $(2W+1) \times (2W+1)$  — размер окна усреднения.

Чтобы на изображении  $Z$  обнаружить точки, окрестность которых обладает сильно выраженной анизотропией, используем меру анизотропности [6, 7]

$$\chi(i_1, i_2) = \frac{\lambda_1(i_1, i_2) - \lambda_2(i_1, i_2)}{\lambda_1(i_1, i_2) + \lambda_2(i_1, i_2)}, \quad (6)$$

где  $\lambda_1(\cdot)$ ,  $\lambda_2(\cdot)$  — собственные значения матрицы (2), причём  $\lambda_1(\cdot) > \lambda_2(\cdot)$ . Мера анизотропности (6) может принимать значения от 0 до 1. Для изотропной локальной окрестности  $\chi = 0$  и окрестности с ЛС  $\chi = 1$ . Считается, что точка с координатами  $(i_1, i_2)$  принадлежит анизотропной области  $\Omega$ , если

$$\chi(i_1, i_2) > C, \quad (7)$$

где  $C$  — наперёд заданный порог. В противном случае принимается решение о том, что точка с координатами  $(i_1, i_2)$  принадлежит неинформативному фону. Для определения локальной ориентации окрестностей точек, принадлежащих  $\Omega$ , используем оценку поля направлений (ПН) на основе ГСТ [6, 7]:

$$\alpha(i_1, i_2) = 0,5 \arctg \frac{2J_{12}(i_1, i_2)}{J_{22}(i_1, i_2) - J_{11}(i_1, i_2)}, \quad \alpha \in [0, 180^\circ]. \quad (8)$$

Тангенс  $\alpha(i_1, i_2)$  равен тангенсу угла наклона линий, проходящих в окрестности точки с координатами  $(i_1, i_2)$ , и при единичном расстоянии между столбцами — оценке взаимного сдвига этих столбцов:

$$\widehat{m}(i_1, i_2 + 1 | i_2) = \text{tg}(\alpha(i_1, i_2)).$$

Если объект движется по прямой, ПН оценивается без ошибок и на изображении отсутствуют царапины и другие дефекты следовоспринимающей поверхности, то ПН будет постоянным для всех точек, принадлежащих области  $\Omega$ . При вертикальных смещениях следообразующей кромки ПН будет изменяться в горизонтальном направлении в соответствии с изменением траектории движения следовоспроизводящего объекта и будет постоянным в вертикальном направлении. В реальных условиях это выполняется для большей части точек анизотропной области  $\Omega$ . Чтобы получить помехоустойчивый алгоритм, предлагается для каждого столбца  $i_2$  области  $\Omega$  вычислить гистограмму ПН  $h_\alpha(\beta | i_2)$ ,  $\beta \in [0, 180^\circ]$  и в качестве оценки взаимного сдвига соседних столбцов использовать тангенс угла, при котором гистограмма достигает максимума:

$$\tilde{m}(i_2 + 1 | i_2) = \text{tg} \left( \max_{\beta} h_\alpha(\beta | i_2) \right). \quad (9)$$

Оценка траектории движения следообразующего объекта (оценка сдвигов столбцов анализируемого изображения относительно первого столбца) имеет вид

$$\tilde{m}(k_2 | 1) = \begin{cases} 0, & k_2 = 1, \\ \sum_{i_2=1}^{k_2-1} \tilde{m}(i_2 + 1 | i_2), & k_2 = \overline{2, N}. \end{cases} \quad (10)$$

Итак, алгоритм оценки траектории движения следообразующего объекта и выпрямления линий следов на основе ГСТ состоит в следующем.

1. Вычисляется ГСТ (2) для каждого положения скользящего окна размером  $(2W+1) \times (2W+1)$ , последовательно занимающего все возможные значения на плоскости аргументов анализируемого изображения  $Z$ . По формуле (6) находится величина меры анизотропности и в соответствии с правилом (7) принимается решение о принадлежности центральной точки скользящего окна анизотропной области  $\Omega$ . Для каждой точки, принадлежащей области  $\Omega$ , вычисляется локальная ориентация линий по формуле (8). По сути, на данном этапе выполняются сегментация и оценивание ПН анизотропных изображений, обладающих ЛС.

2. Для каждого столбца анизотропной области  $\Omega$  вычисляется гистограмма  $h_\alpha(\beta | i_2)$ ,  $\beta \in [0, 180^\circ]$ , по которой в соответствии с формулой (9) определяется оценка взаимного сдвига соседних столбцов  $\tilde{m}(i_2 + 1 | i_2)$ .

3. Оценка траектории движения следообразующего объекта  $\tilde{m}(k_2 | 1)$ ,  $k_2 = \overline{2, N}$ , определяется по формуле (10).

4. Выполняется геометрическое преобразование анализируемого изображения  $Z$  путём вертикального сдвига каждого столбца относительно первого столбца на величину  $\tilde{m}(k_2 | 1)$ , взятую с обратным знаком. После обрезания верхнего и нижнего краёв в целях удаления отсчётов с неопределёнными значениями яркости получим скорректированное изображение

$$Z_m = \{z_m(i_1, i_2), \quad i_1 = \overline{1, N_1}, \quad i_2 = \overline{1, N}\}$$

с выпрямленными горизонтальными линиями, где вертикальный размер

$$N_1 = N - \left( \max_{k_2}(\tilde{m}(k_2 | 1)) - \min_{k_2}(\tilde{m}(k_2 | 1)) \right).$$

Для решения задачи идентификации сигнатура может быть легко вычислена путём усреднения значений яркости вдоль строк изображения с выпрямленными линиями следов. Чтобы уменьшить искажения сигнатуры, обусловленные медленными флуктуациями яркости и контраста изображения (возникающими из-за изменения давления движущегося объекта на следовоспринимающую поверхность, неравномерности освещённости и ряда других факторов), выполняется локально-адаптивная нормализация столбцов изображения  $Z_m$  на основе локальных моментов первого и второго порядка [11]:

$$Z_m^n = \left\{ z_m^n(i_1, i_2) = \frac{z_m(i_1, i_2) - \bar{z}_{m, i_2}(i_1)}{\sigma_{i_2}(i_1)}, \quad i_1 = \overline{1, N_1}, \quad i_2 = \overline{1, N} \right\},$$

где  $\bar{z}_{m, i_2}(i_1)$ ,  $\sigma_{i_2}(i_1)$  — вычисленные для  $i_2$ -го столбца среднее значение и стандартное отклонение (как мера контраста) локальной вертикальной окрестности размером  $2W_s + 1$  элементов с центром в точке  $i_1$ . В результате сигнатура

$$S = \left\{ s(i_1) = \frac{1}{N} \sum_{i_2=1}^N z_m^n(i_1, i_2), \quad i_1 = \overline{1, N_1} \right\}. \quad (11)$$

**Количественная мера прямолинейности следов.** Для оценки эффективности и сравнения различных алгоритмов выпрямления линий следов необходима объективная мера качества, на основе которой отдаётся предпочтение тому или иному алгоритму. Поскольку идентификация объектов выполняется на основе сигнатур, то используем их при оценке качества алгоритмов выпрямления линий. Для этого одномерную сигнатуру  $S$  преобразуем в двумерное изображение  $Z_s$ , растянув её (выполнив обратное проецирование [12]) по всей плоскости нормализованного скорректированного изображения  $Z_m^n$ , в соответствии с выражением

$$Z_s = \left\{ z_s(i_1, i_2) = s(i_1), \quad i_1 = \overline{1, N_1}, \quad i_2 = \overline{1, N} \right\}.$$

В качестве меры используем коэффициент взаимной корреляции  $R$  между изображениями  $Z_m^n$  и  $Z_s$ , который для данного способа формирования  $Z_s$  может принимать значения от 0 до 1.

Очевидно, что предложенная мера качества определяется собственными характеристиками линий. Если следы объекта на изображении представляют собой совокупность горизонтальных прямых линий, то при отсутствии шума коэффициент взаимной корреляции  $R$  будет максимальным. Чем сильнее линии следа отличаются от прямой, тем меньше  $R$  при прочих равных условиях.

**Экспериментальные исследования алгоритмов.** Настройка корреляционного алгоритма (1) и алгоритма на основе ГСТ проводилась по 15 изображениям следов различных объектов, в результате чего были определены их параметры:  $\Delta = 20$ ,  $W = W_s = 11$ ,  $C = 0,5$ , удовлетворяющие максимуму коэффициента взаимной корреляции  $R$ , где  $\Delta = j_2 - i_2$  — расстояние между столбцами, для которых вычисляется НВКФ в корреляционном алгоритме (1).

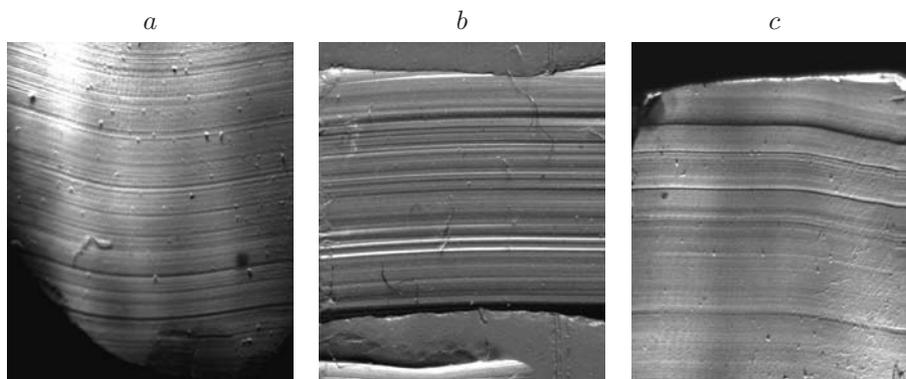


Рис. 2

Было установлено, что точность оценки корреляционного алгоритма в значительной мере зависит от параметра  $\Delta$ . Если столбцы располагаются слишком близко друг к другу, то величина сдвига  $\tilde{m}(j_2 | i_2)$  мала по сравнению с величиной шума, что приводит к так называемым нормальным ошибкам оценивания, возрастающим при уменьшении  $\Delta$ . При увеличении  $\Delta$  уменьшается величина абсолютного максимума НВКФ из-за искажений, обусловленных царапинами, пылью, неравномерностью освещения, неоднородностью следовоспринимающей поверхности и рядом других факторов. В этом случае вероятность аномальных ошибок возрастает, если в качестве максимума НВКФ будет принят её ложный максимум.

В алгоритме на основе ГСТ для вычисления производных использовались оператор Собела и оптимальные масочные дифференцирующие фильтры (МДФ) [10]

$$h_1 = \begin{bmatrix} 0,27 & 0 & -0,27 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0,27 & 0 & -0,27 \end{bmatrix}, \quad h_2 = h_1^T = \begin{bmatrix} 0,27 & 1 & 0,27 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0,27 & -1 & -0,27 \end{bmatrix},$$

минимизирующие систематическую ошибку.

После настройки алгоритмов были проведены экспериментальные исследования по трём дополнительным реальным изображениям следов объектов, приведённым на рис. 2. Результаты выпрямления линий следов корреляционным алгоритмом и алгоритмом на основе ГСТ с оптимальным МДФ представлены на рис. 3 и 4 соответственно. В таблице даны значения меры прямолинейности следов  $R$  для исходных и скорректированных изображений.

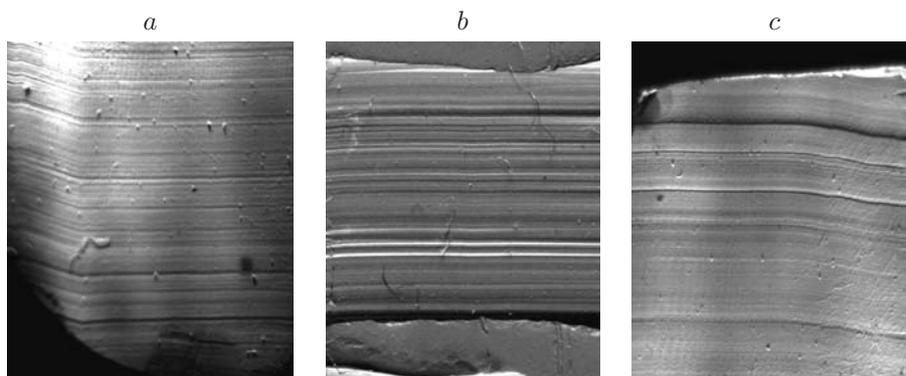


Рис. 3

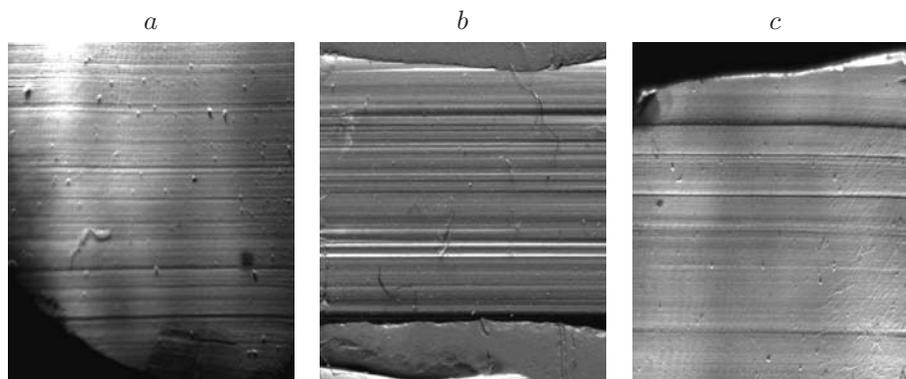


Рис. 4

| Изображения      | Мера прямолинейности следов |                         |                        |                 |
|------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------|
|                  | Исходные изображения        | Корреляционный алгоритм | Алгоритм на основе ГСТ |                 |
|                  |                             |                         | Оператор Собела        | Оптимальный МДФ |
| Рис. 2, <i>a</i> | 0,189                       | 0,435                   | 0,630                  | 0,665           |
| Рис. 2, <i>b</i> | 0,432                       | 0,761                   | 0,779                  | 0,794           |
| Рис. 2, <i>c</i> | 0,365                       | 0,375                   | 0,519                  | 0,556           |

**Заключение.** В данной работе представлен алгоритм оценивания траектории движения и выпрямления линий следов, основанный на ГСТ. В качестве количественной меры прямолинейности следов, предназначенной для оценки эффективности работы алгоритмов, предложено использовать коэффициент взаимной корреляции между нормализованным изображением и изображением, полученным из сигнатуры методом обратного проецирования. Результаты экспериментальных исследований продемонстрировали устойчивость работы рассмотренного алгоритма при наличии на изображениях неинформативных областей достаточно больших размеров. Предложенная мера прямолинейности следов адекватно отражает качество работы алгоритмов. Визуальная и количественная оценки эффективности алгоритмов показали, что для приведённых изображений алгоритм на основе ГСТ выигрывает по сравнению с корреляционным алгоритмом, в частности мера прямолинейности  $R$  увеличилась в среднем более чем на 25 %. Применение оптимального МДФ в данном алгоритме обеспечило увеличение  $R$  примерно на 4,5 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geradts Z., Keijzer J., Keereweer I. Automatic comparison of striation marks and automatic classification of shoe prints // Proc. SPIE. 1995. **2567**. P. 151–164.
2. Feigin G., Aperman A., Springer E., Jungmann N. Computerized tool mark comparison // Ibid. P. 145–150.
3. Heizmann M., Puente León F. Model-based analysis of striation patterns in forensic science // Proc. SPIE. 2000. **4232**. P. 533–544.
4. Heizmann M. Automatische Auswertung von Riefenspuren in der Kriminaltechnik // Sensoren und Meßsysteme-2002. ITG/GMA Fachtagung. Berlin: VDE-Verlag, 2002. S. 375–378.
5. Heizmann M., Puente León F. Imaging and analysis of forensic striation marks // Opt. Eng. 2003. **42**, N 12. P. 3423–3432.

- 
6. **Bigun J.** Vision with direction: A systematic introduction to image processing and computer vision. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 395 p.
  7. **Яне Б.** Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2007. 584 с.
  8. **Грузман И. С., Новиков К. В.** Сегментация анизотропных изображений на основе локальных спектральных характеристик // Автометрия. 2004. **40**, № 4. С. 26–32.
  9. **Грузман И. С., Карпушин В. Б.** Использование поля направлений для оценки параметров геометрических искажений // Автометрия. 2008. **44**, № 5. С. 3–11.
  10. **Грузман И. С., Карпушин В. Б.** Синтез градиентных алгоритмов с минимальной систематической ошибкой оценивания поля направлений // Автометрия. 2010. **46**, № 1. С. 2–11.
  11. **Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. 1072 с.
  12. **Грузман И. С., Киричук В. С., Косых В. П. и др.** Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 352 с.

*Поступила в редакцию 1 декабря 2010 г.*

---