образуются дополнительные площади, обработка которых требует дополнительных вычислительных затрат.

2. Дополнительные площади в углах многоугольников имеют максимальные значения при генерации изображения из треугольных граней. При увеличении количества ребер граней дополнительные площади уменьшаются.

3. С ростом производительности ССВО влияние дополнительных площадей в углах многоугольников возрастает. Поэтому при реализации ССВО высокой производительности необходимо принимать специальные меры для удаления из обработки дополнительных площадей в углах многоугольников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ковалев А. М., Токарев А. С.** К оценке производительности алгоритмов фильтрации синтезированных изображений // Автометрия.—1989.—№ 2.
2. **Fuch H.** Fast spheres, shadows, textures, and image enhancement in pixel-planes // Comput. Graph.—1985.—**19**(3).
3. **Carpenter L.** The a-buffer, an antialiased hidden surface method // Comput. Graph.—1984.—**18**(3).
4. **Grow F. C.** The aliasing problem in computer generated shaded images // CACM.—1977.— N 11.
5. **Catmul E.** An analytic visible surface algorithm for independent pixel processing // Comput. Graph.—1984.—**18**(3).

Поступила в редакцию 5 февраля 1991 г.

УДК 681.3.06

М. М. Лагиева, В. М. Хачумов, Д. В. Шабалов

(Махачкала)

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ЛИНИЙ ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Предлагается алгоритм построения взвешенных линий и векторов, задающих ориентацию и линейные размеры полутоновых изображений. Приводятся примеры измерения углов поворота между двумя положениями изображения.

Наличие геометрических преобразований в системах с техническим зрением приводит к существенному различию эталонов и реальных изображений, что затрудняет решение задачи идентификации [1, 2].

В настоящее время сложилось несколько подходов к сравнению преобразованных изображений. Основными являются методы, использующие корреляционные алгоритмы [3, 4], байесовский подход и статистический принцип инвариантности [5, 6], нормализацию [7]. Один из эффективных способов нормализации группы аффинных преобразований — построение инвариантных прямых, связывающих входное и эталонное изображения [7].

В рамках данного подхода предлагается один из алгоритмов построения линий положения, позволяющий определять ориентацию полутоновых изображений на плоскости и вырабатывать стратегию их нормализации для последующей идентификации.

Под полутоновым изображением принято понимать [4] двумерное дискретное поле (матрицу) яркостей (интенсивностей), представленное в виде функции $m(x, y)$, где m — яркость в точке (x, y). Предположим, что над матрицей определены такие преобразования, как сжатие, растяжение вдоль осей, а также сдвиги и повороты. Точка дискретного поля вне объекта не подсвечивается, т. е. $m = 0$.

В дальнейшем для удобства примем, что любой исследуемый объект задается перечислением его n точек, причем для каждой i-й точки определены координаты x_i, y_i и яркость m_i. Ориентацию объекта на экранной плоскости зададим линией положения. Линия проводится таким образом, чтобы сумма S произведений квадратов расстояний от точек изображения до линии положения эквивалентной яркости (веса) была минимальной (по аналогии с известным методом наименьших квадратов):

$$S = \sum_{i=1}^{n} s_i^2 m_i, \tag{1}$$

где $s_i = \sqrt{(\tilde{x} - x_i)^2 + (\tilde{y} - y_i)^2}$, x, y — координаты текущей точки пересечения линии положения и прямой, проходящей перпендикулярно к ней через точку (x_i, y_i). Пусть уравнение линии положения есть $y = a_0 + a_1 x$, тогда

$$\tilde{x} = (a_1 y_i + x_i - a_0 a_1)/(a_1^2 + 1),$$

$$\tilde{y} = a_0 + a_1(a_1 y_i + x_i - a_0 a_1)/(a_1^2 + 1),$$

откуда

$$(\tilde{x} - x_i) = -a_1(a_0 + a_1 x_i - y_i)/(a_1^2 + 1),$$

$$(\tilde{y} - y_i) = (a_0 + a_1 x_i - y_i)/(a_1^2 + 1),$$

$$s_i = (a_0 + a_1 x_i - y_i)/\sqrt{a_1^2 + 1}.$$

Таким образом, выражение (1) приводится к виду

$$S = \sum_{i=1}^{n} \left[(a_0 + a_1 x_i - y_i)/(\sqrt{a_1^2 + 1})\right]^2 m_i. \tag{2}$$

Очевидно, что S является функцией переменных a_0, a_1, причем нужно найти такие значения a_0, a_1, при которых величина S достигает минимума. Достаточное условие экстремума данной функции (2) — равенство нулю частных производных dS/da_0, dS/da_1:

$$dS/da_0 = 2\sum_{i=1}^{n} m_i\left[(a_0 + a_1 x_i - y_i)/\sqrt{a_1^2 + 1}\,\right] = 0,$$

$$dS/da_1 = 2\sum_{i=1}^{n} m_i\left[(a_0 + a_1 x_i - y_i)/\sqrt{a_1^2 + 1}\,\right] \times$$

$$\times \left\{\left[x_i(a_1^2 + 1) - a_1(a_0 + a_1 x_i - y_i)\right] / \left[(a_1^2 + 1)\sqrt{a_1^2 + 1}\right]\right\} = 0.$$

После раскрытия скобок и проведения необходимых преобразований получим

$$a_0 \sum_{i=1}^{n} m_i + a_1 \sum_{i=1}^{n} x_i m_i - \sum_{i=1}^{n} m_i y_i = 0, \tag{3}$$

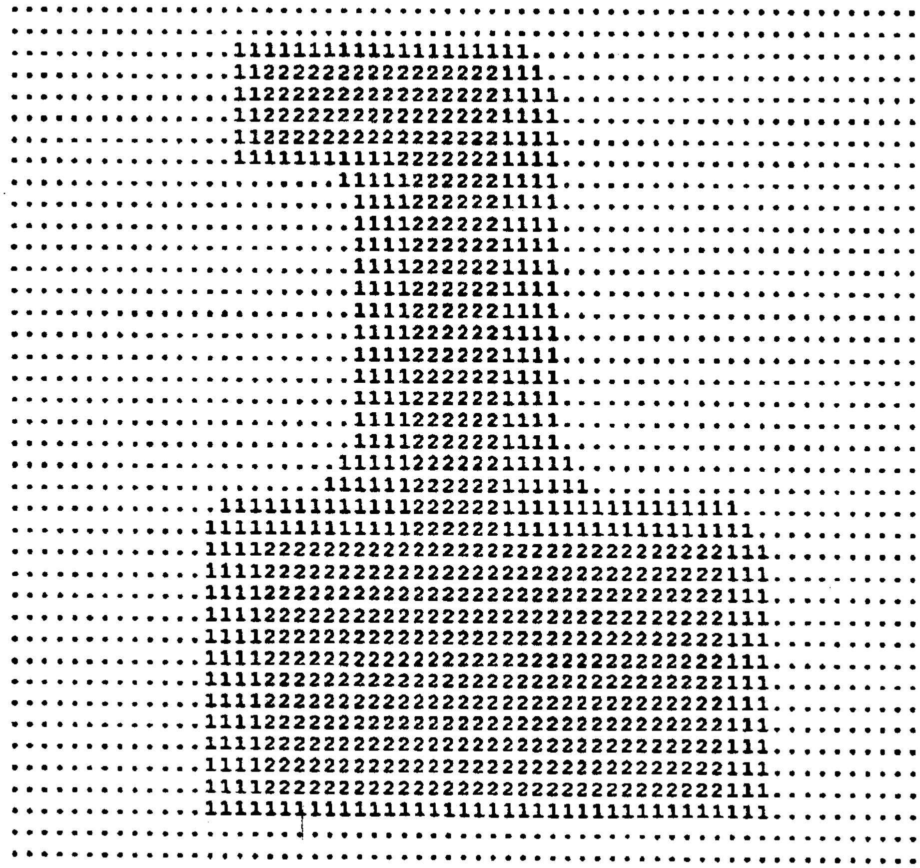


Рис. 1

$$a_0 \sum_{i=1}^{n} m_i x_i + a_1 \sum_{i=1}^{n} m_i (x_i^2 + y_i^2) - a_1 a_0^2 \sum_{i=1}^{n} m_i - a_0 a_1^2 \sum_{i=1}^{n} m_i x_i +$$

$$+ 2a_1^2 \sum_{i=1}^{n} m_i x_i y_i - \sum_{i=1}^{n} m_i x_i y_i = 0. \tag{4}$$

Система из линейного (3) и нелинейного (4) уравнений решается методом подстановки. Из уравнения (3) получим выражение для a_0:

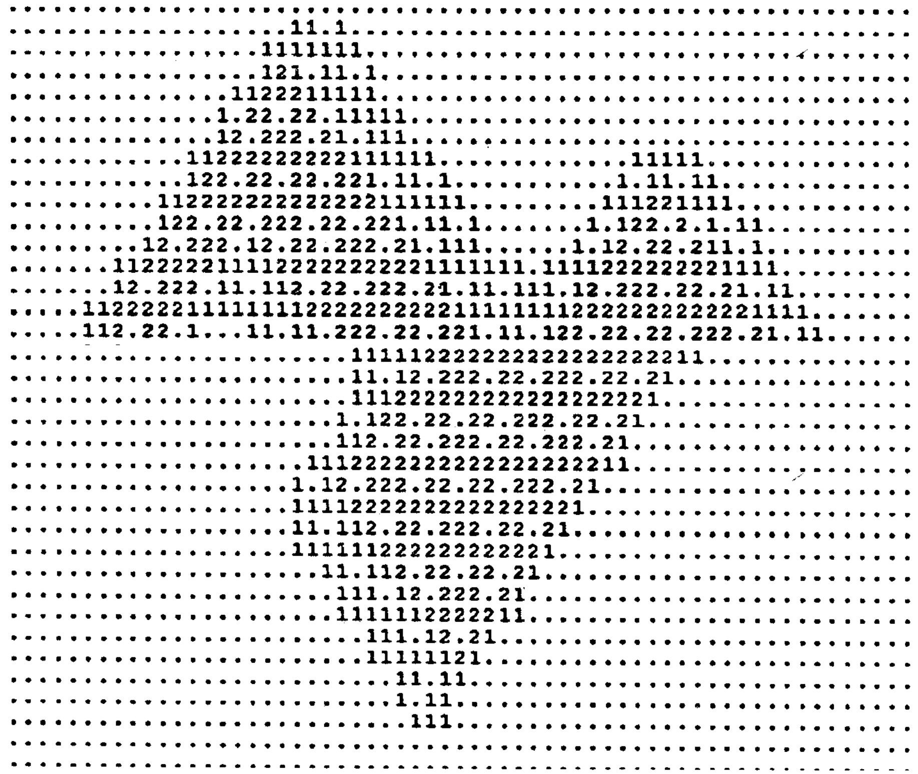
$$a_0 = \left(\sum_{i=1}^{n} m_i y_i - a_1 \sum_{i=1}^{n} m_i x_i \right) / \sum_{i=1}^{n} m_i. \tag{5}$$

Подставляя (5) в уравнение (4), получим квадратное уравнение вида

$$p a_1^2 + q a_1 - p = 0, \tag{6}$$

где

$$p = \sum_{i=1}^{n} m_i \sum_{i=1}^{n} m_i x_i y_i - \sum_{i=1}^{n} m_i y_i \sum_{i=1}^{n} m_i x_i,$$



Угол равен 44,63°

Рис. 2

$$q = \sum_{i=1}^{n} m_i \left(\sum_{i=1}^{n} m_i x_i^2 - \sum_{i=1}^{n} m_i y_i^2 \right) + \left(\sum_{i=1}^{n} m_i y_i \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} m_i x_i \right)^2 .$$

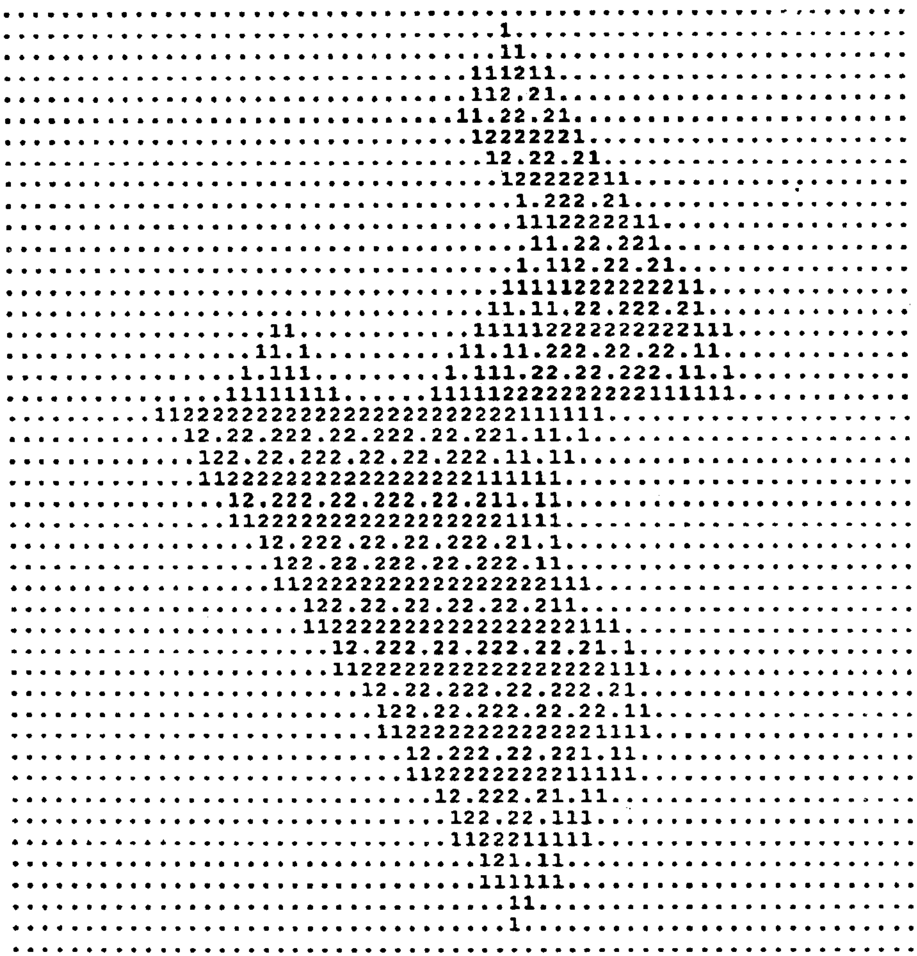
Решение системы (3), (4) дает две пары значений коэффициентов $a_0 a_1$, из которых следует выбрать ту, которая удовлетворяет минимуму критерия (2).

Линия положения задает ориентацию объекта с точностью до 180°. Необходимые уточнения по расположению могут быть дополнительно внесены путем, например, подсчета числа точек объекта, находящихся в разных полуплоскостях дискретного поля, разделяемых искомой линией.

Интересным свойством линии положения является ее прохождение через центр «тяжести» изображения, определяемый по формулам

$$X = \sum_{i=1}^{n} m_i x_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} m_i, \quad Y = \sum_{i=1}^{n} m_i y_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} m_i.$$

В этом можно убедиться путем подстановки величин X, Y и a_0 в уравнение линии положения, которое обращается при этом в тождество.



Угол равен 134,98°

Рис. 3

На основании полученных соотношений была разработана процедура поиска угла между двумя положениями изображения, результаты моделирования которой отражены в таблице, где Φ_1 и Φ_2 — углы поворота, полученные в результате измерений соответственно для неравностороннего треугольника, представленного 43 точками, и прямоугольника размерностью 5×7 при $m = 1$; Φ — истинный угол поворота.

Ф, град	Φ_1, град	Φ_2, град
15	17,57	21,52
30	31,55	26,92
45	43,18	45
60	58,64	61,14

Имеющие место погрешности измерений связаны с искажением линейных размеров изображений при их повороте и размещении в дискретном поле и зависят от размерности дискретного изображения.

Для нахождения линейных размеров полутоновых изображений с использованием линии положения введем понятие вектора положения $F1F2$, направленного из точки $F1$ в $F2$. При этом предполагается, что точка $F1$ совмещается с центром X, Y, а $F2$ лежит на линии положения. Длина вектора должна определять некоторый обобщенный линейный размер изображения, т. е. его масштаб. Следует отметить, что выбранный нами критерий (1) является инвариантом по отношению к поворотам и сдвигам полутонового изображения, что определяется выражением (2). Если принять процедуру расширения следующим образом: число точек изображения и их яркости остаются неизменными, а при сжатии яркость точки дискретного поля определяется суммой яркостей совмещенных в ней точек объекта, то величина S может служить характеристикой линейного размера изображения, поскольку она пропорциональна квадрату коэффициента масштабирования. Следовательно, длине вектора $F1F2$ можно присвоить (поставить в соответствие) значение S.

Изложенное позволяет выбрать стратегию приведения параметров эталона к исследуемому изображению. Эталон и изображение совмещаются своими центрами, далее производятся поворот эталона до совпадения линий положения и его масштабирование до совпадения векторов $F1F2$.

На рис. 1—3 приведен пример идентификации полутонового изображения размерностью 64×64, повернутого относительно эталона (см. рис. 1) на 45° (левый поворот — рис. 2, правый — рис. 3). Здесь яркость каждой точки представляется соответствующей цифрой. Как видно из рисунков, вычисление углов поворота с использованием данного метода дает относительную погрешность в среднем 0,4 % с учетом возможной коррекции результатов измерения на 180°.

Предложенный метод построения линий положения для идентификации полутоновых изображений сочетает относительную простоту реализации с высокой достоверностью получаемых результатов. Программная реализация алгоритмов сравнения объекта с эталонами, выполненная применительно к ПЭВМ IBM PC/AT, отличается компактностью и хорошим быстродействием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов В. М., Резник А. Л. Алгоритмы идентификации фрагментов двух изображений, инвариантных к повороту // Автометрия.—1984.—№ 5.
2. Аннин С. Н., Ковтонюк Н. Ф., Костюк А. В., Одиноков С. Б. Метод сравнения смещенных изображений // Автометрия.—1990.—№ 3.
3. Бочкарев А. М. Корреляционно-экстремальные системы навигации // Зарубеж. радиоэлектрон.—1981.—№ 9.
4. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен.—М.: Мир, 1976.
5. Леман Э. Проверка статистических гипотез.—М.: Наука, 1979.
6. Тихонов Д. В., Экало А. В. Инвариантная к геометрическим искажениям идентификация элементов изображений точечной динамической сцены // Автометрия.—1990.—№ 3.
7. Путятин Е. П., Аверин С. И. Обработка изображений в робототехнике.—М.: Машиностроение, 1990.

Поступила в редакцию 11 марта 1991 г.

УДК 621.396.96

А. С. Кузнецов

(Санкт-Петербург)

ВЫБОР ЧАСТОТ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ С ПОМОЩЬЮ КОРОТКОИМПУЛЬСНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ

Рассмотрена методика выбора наиболее информативных для распознавания групп частот при зондировании проводящих объектов короткими радиоимпульсами. На основании экспериментальных данных проанализирована эф-