Рис. 7 синтезирован обычным способом [1] с использованием одной диагонали таблицы текстурных копий при $H = L$. Как следствие проявляется «размывание» четких границ шахматных клеток в горизонтальном направлении и значительный смаз изображения по мере удаления от наблюдателя. Рис. 8 синтезирован с помощью предложенного метода. Четкость изображения заметно увеличилась. По мере удаления от наблюдателя алгоритм синтеза уверенно «находит» высокие пространственные частоты, которые можно воспроизвести без элайсинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ковалев А. М., Тарасов Ю. В.** Текстура на произвольно ориентированных плоских поверхностях // Автометрия.— 1988.— № 6.
2. **Crow F. C.** Advanced image synthesis — anti-aliasing // Advances in Comput. Graph — Springer-Verlag. 1986.

Поступила в редакцию 29 октября 1990 г.

УДК 681.3.019

В. С. КИРИЧУК, Н. С. ЯКОВЕНКО

(Новосибирск)

ЛИНЕЙНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В ЗАДАЧЕ ПОИСКА ОБЪЕКТОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ

Классическая методика согласованной линейной фильтрации требует свертки изображения D с n функциями вида

$$F_l = K^{-1}h_l, \quad l = \overline{1, n},$$

определяемыми формой объекта h_l и корреляционной функцией фона K, с последующим вычислением максимума взвешенного отклика F_lD (где n — число форм объектов), согласно критерию отношения правдоподобия. Однако при наличии на изображении нескольких объектов одной и той же формы, но неизвестной ориентации, т. е. задаваемых соотношениями

$$h_l(x, y) = h(x_l + \xi \cos \varphi_l - \eta \sin \varphi_l,\ y_l + \xi \sin \varphi_l + \eta \cos \varphi_l),$$

где x_l, y_l — координаты объектов; φ_l — углы поворота (априори неизвестные), необходимо определение максимума отношения правдоподобия при переборе всех возможных ориентаций объекта, что вряд ли приемлемо в практических задачах из-за чрезмерных вычислительных затрат.

В [1] предложена методика поиска идентичных фрагментов, «нечувствительная» к повороту фрагментов и основанная на представлении фрагментов в функциональном базисе, инвариантном к повороту. В предлагаемой работе осуществляется развитие такого подхода применительно к поиску объектов, причем основные вычислительные процедуры сведены к линейной фильтрации.

Алгоритм. Пусть задано представление формы объекта в полярной системе координат:

$$h(\rho_l, \varphi_k),\ l = \overline{1, m},\ k = \overline{1, n_l},$$

где m — число колец, на которых задан объект; n_l — число точек на кольце радиуса ρ_l;

$$\varphi_k = \frac{2\pi}{n_l}(k-1), \quad k = 1,\ n_l.$$

Переход от декартовой к полярной системе координат $(x, y) \to (\rho, \varphi)$ требует применения (в силу несовпадения узлов прямоугольной и полярных решеток) процедур интерполяции и сводится к линейному преобразованию P вектора h (полученному каким-либо упорядочиванием $h(\xi, \eta)$) в вектор M — некоторое упорядочивание описания объекта в полярной системе координат по φ_k и ρ_l:

$$M = Ph,\ M = \{M_1,\ M_2,\ \ldots,\ M_m\}, \tag{1}$$

где M_i — векторы, составленные из точек, лежащих на радиусе ρ_i; P — матрица линейного преобразования.

Разложим M_i, $i = 1,\ m$, в ряд Фурье:

$$\begin{gathered} M_i = Q_i q_i + S_i s_i + C_i c_i, \\ q_i = Q_i^T M_i, \quad s_i = S_i^T M_i, \quad c_i = C_i^T M_i, \end{gathered} \tag{2}$$

где S_i, C_i — ортонормированные базисы синусов и косинусов; Q_i — вектор постоянной составляющей.

Пусть анализируемый фрагмент L (также заданный в полярной системе координат) отличается от эталонного изображения объекта амплитудой A и углом поворота φ. Определив разложение L по базисным функциям Q_i, S_i, C_i, $i = 1,\ m$, несложно получить соотношения для коэффициентов разложения:

$$\begin{gathered} q_i^* = Q_i L, \quad q_i^* = A q_i, \quad s_i^* = S_i^T L, \quad c_i^* = C_i^T L, \\ s_i^*(j) = A\{s_i(j)\cos(j\varphi) - c_i(j)\sin(j\varphi)\}, \quad i = 1,\ m, \\ c_i^*(j) = A\{s_i(j)\sin(j\varphi) + c_i(j)\cos(j\varphi)\}, \quad j = 1,\ n, \end{gathered} \tag{3}$$

где n — число гармоник в разложении. Необходимо определить наличие таких объектов L на изображении и оценить их координаты. Проверяя в каждой точке поля гипотезу о наличии объекта и используя в качестве критерия отношение правдоподобия W (при гауссовых некоррелированных шумах), несложно получить зависимость W от φ:

$$W = \sum_{k=1}^{m} q_k q_k^* + \sum_{i=1}^{n} \{I_i \cos(i\varphi) + J_i \sin(i\varphi)\}, \tag{4}$$

где

$$I_i = \sum_{k=1}^{m} s_k^*(i)\, s_k(i) + c_k^*(i)\, c_k(i),$$

$$J_i = \sum_{k=1}^{m} c_k^*(i)\, s_k(i) - s_k^*(i)\, c_k(i).$$

Таким образом, значение критерия W зависит от исходного изображения L через статистики

$$T = \sum_{k=1}^{m} q_k q_k^*; \quad I_i,\ J_i, \quad i = 1,\ n,$$

которые в силу их линейной связи с L представимы в виде

$$T = F_t L,\ I_i = F_I(i) L,\ J_i = F_J(i) L,$$

где F_t, F_I, F_J — матрицы, выражающиеся через матрицы Q, S, C согласно соотношениям (3), (4). Использование (1) позволяет выразить статистики через исходное изображение D, заданное на квадратной решетке:

$$T = F_t PD,\ I_i = F_I(i)PD,\ J_i = F_J(i)PD. \tag{5}$$

Таким образом, задача поиска объекта сводится к линейной фильтрации исходного изображения $2n+1$ фильтрами F_tP, $F_I(i)P$, $F_J(i)P$, $i = 1, n$, и поиску максимума W по параметру φ в каждой точке исходного изображения.

Пусть α_i — углы, при которых достигается максимум i-й компоненты W; тогда

$$I_i \cos(i\varphi) + J_i \sin(i\varphi) = \sqrt{I_i^2 + J_i^2} \cos(i\varphi - \alpha_i),$$

$$\alpha_i = \operatorname{arctg}(J_i/I_i)$$

и выражение для W преобразуется к виду

$$W = T + \sum_i \sqrt{I_i^2 + J_i^2} \cos(i\varphi - \alpha_i),$$

т. е. минимизация W сводится к решению нелинейного уравнения

$$W'_\varphi = \sum_i \sqrt{I_i^2 + J_i^2} \sin(i\varphi - \alpha_i)\, i = 0.$$

При использовании предлагаемого алгоритма для случая, когда фон коррелирован, необходимо предварительно провести операцию декорреляции.

Число гармоник ряда Фурье определяется при разложении объекта путем сравнения нормы разности объекта и его описания.

Программная реализация и экспериментальные результаты. Программная реализация осуществлялась на ЭВМ «Электроника 79», оснащенной специализированной аппаратурой для обработки изображений [2].

На цифровом поле точек случайно генерировались изображения объектов произвольной ориентации. Объект формировался как композиция двух гауссоид с программно-управляемыми параметрами: координатами, ориентацией, взаимным расположением и амплитудами. Основной задачей была проверка эффективности предложенного алгоритма по отношению к процедуре оптимальной фильтрации при варьировании в широком диапазоне всех параметров объектов. В качестве критерия эффективности выбрано отношение нормированных на дисперсию выходного поля откликов A_L предлагаемого фильтра к отклику A_0 оптимального (соответствующего полностью известной форме объектов) фильтра. Приведем типичный пример:

n	1	2	3
$\widehat{A}_L/\widehat{A}_0$	0,89	0,94	0,95
A_L/A_0	0,91	0,933	0,94

В первой строке приведены экспериментальные данные, во второй — расчетные.

При фильтрации фильтром, не учитывающим разворот объектов, получена эффективность $\widehat{A}_L/\widehat{A}_0 = 0{,}44$.

Характерные времена выполнения программы составляли 3000 с (поля 256×256 точек, размер объекта 32×32, 7 фильтров), а при использовании процессора линейной фильтрации — 60 с. Это доказывает, что основные вычислительные затраты в алгоритме ~ 98 % приходятся на линейную фильтрацию.

Таким образом, предложенный алгоритм инвариантен к повороту выделяемых объектов и обеспечивает достаточно высокую эффективность (особенно при использовании для выполнения линейной фильтрации специализированных вычислительных средств).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ефимов В. М., Резник А. Л.** Алгоритмы идентификации фрагментов двух изображений, инвариантные к повороту // Автометрия.— 1984.— № 5.
2. **Киричук В. С., Поташников А. К.** Система цифровой обработки с двухшинной архитектурой // Автометрия.— 1988.— № 2.

Поступила в редакцию 27 декабря 1990 г.

УДК 519.67 : 629.78

Г. И. ПЕРЕТЯГИН

(Новосибирск)

ОБ ОБНАРУЖЕНИИ ГРУППЫ ОБЪЕКТОВ ПЕРЕМЕННОЙ ЯРКОСТИ НА ИЗОБРАЖЕНИИ

Сущность проблемы обнаружения состоит в решении вопроса о наличии или отсутствии заданного объекта (или группы объектов) на изображении. Хорошо известно [1], что процесс оптимального обнаружения сводится к следующим этапам:

— построение ядра фильтра, согласованного с формой объектов и статистикой фона;

— фильтрация изображения заданным ядром;

— селекция локальных экстремумов и принятие решений о соответствии величин экстремумов откликам объектов.

Причем если процедура поиска и выделения объектов заданной формы и яркости достаточно прозрачна (см. [1]), то в ситуации, когда яркость объектов определяется множеством факторов и нет информации о действительном их наличии на анализируемом снимке, требуются достаточно серьезные основания для объявления тех или иных элементов изображения откликами объектов. Формально класс задач такого рода относится к так называемой проблеме соскальзывания (slippage problems [2]), имеющей дело с разработкой критериев идентификации элементов, выделяющихся в некотором смысле из статистически однородного множества. В частности, если число выделяющихся (аномальных) наблюдений априори задано, то можно найти статистически оптимальное правило обнаружения этих наблюдений [3].

При построении статистического критерия, обеспечивающего обнаружение неизвестного числа аномальных выбросов случайного поля, нужна информация о поведении отфильтрованных переменных на «хвостах» их совместного распределения. Если такая информация имеется, то можно провести статистическое сравнение эмпирического распределения с ожидаемым (теоретическим) и выделить области их значимого расхождения. Для решения поставленной задачи здесь привлекается и исследуется метод, разработанный Большевым и Убайдуллаевой [4, 5], позволяющий построить достаточно простой алгоритм селекции выбросов в выборке и, следовательно, выделить статистически значимые отклики объектов на согласованный фильтр.

Везде далее будем полагать U, V и т. д. n^2-мерными векторами, полученными из $[n \times n]$-матриц изображений $[U]$, $[V]$ и т. д. «разверткой» их в одномерную последовательность некоторым регулярным способом (например, по столбцам).

Будем считать, что форма (s) и яркость (a) объектов связаны соотношением

$$s_i(x, y) = a_i s_0(x, y), \quad (x, y) \in \Omega_0, \ i = \overline{1, m}.$$

Фоновое изображение предполагается стационарным гауссовым случайным полем. Селекция объекта заданной формы сводится к скользящей свертке изображения U с ядром согласованного фильтра Φ_{xy} (опре-