элементы которой являются оценками дисперсий параметров ($\hat{b}_1$, $\hat{b}_2$, ..., $\hat{b}_M$). В частности, для схемы соседства с тремя параметрами ($b_{0,1}$, $b_{1,0}$, $b_{1,1}$) (матрица A — невырожденная) дисперсия $\hat{\sigma}^2_{b_{0,1}} = 0{,}0001$, откуда можно заключить, что параметр $b_{0,1}$ — незначимый $\left(\hat{b}_{0,1} = 0{,}0157 < 3\hat{\sigma}_{b_{0,1}} = 0{,}03\right)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Rosenfeld A., Kak A. C.** Digital picture processing.— N. Y.: Academic Press, 1976.
2. **Синай Я. Г.** Теория фазовых переходов.— М.: Наука, 1980.
3. **Перетягин Г. И.** Описание и статистический анализ двумерных случайных полей: Тез. докл. I Всесоюз. конф. АСОИЗ-81.— М.: Наука, 1981.
4. **Драган Я. П.** Структура и представление моделей стохастических сигналов.— Киев: Наукова думка, 1980.
5. **Закс Ш.** Теория статистических выводов.— М.: Мир, 1975.
6. **Сборник** научных программ на ФОРТРАНе.— М.: Статистика, 1974, вып. 2.

Поступила в редакцию 24 июня 1983 г.

УДК 681.32.05

И. В. БЕЛАГО, М. А. СТАРКОВ

(Новосибирск)

АНАЛИЗАТОР ИЗОБРАЖЕНИЙ

Широкое применение дистанционных методов в различных областях народного хозяйства стимулирует развитие автоматизации процесса распознавания объектов на аэрокосмических изображениях и связанных с ним методов измерения различных параметров уже опознанных областей. В свою очередь, развитие робототехники диктует необходимость создания систем, способных анализировать текущую обстановку за время, определяемое скоростью технологического процесса. Решение указанных задач можно схематично разбить на три этапа:

1) ввод изображения и его предварительная обработка (дискретизация и квантование исходного снимка, уменьшение влияния шумов и т. д.);

2) сегментация (выделение однородных по некоторым признакам областей или границ между ними);

3) интерпретация выделенных областей.

Авторы этой работы предлагают свой подход к реализации второго этапа перечисленных выше задач. Рассмотрим основные методы сегментации. Наиболее простой из них — сравнение значения признака (например, яркости) в каждой точке изображения с порогом [1]. Пороги при этом выбираются в точках локальных минимумов гистограммы. Этот метод чаще всего применяют для получения бинарных изображений, например изображения печатного листа.

Другой метод состоит в том, чтобы «вырастить» объект из некоторого элемента изображения, принадлежащего однородной области [2]. Методы «выращивания» областей являются локальными, что дает возможность уменьшить влияние общей неоднородности изображения. Основной их недостаток заключается в многошаговости алгоритмов, так как число проверок порой довольно сложного критерия однородности пропорционально числу точек изображения. Уменьшить количество шагов позволяют методы прослеживания контуров [3, 4]. К сожалению, наличие шумов нередко серьезно снижает эффективность работы указанных алгоритмов. Нами предпринята попытка выделить связные однородные области, минуя процедуры нахождения границ и построения соответствующих аппроксимирующих линий. Разработанный алгоритм также формирует таблицы описаний выделенных областей и граф смежностей. Эта информация имеет большое значение для фильтрации изображения по выбранным признакам и в некоторых случаях может служить базой для решений задач третьего этапа. Перейдем к содержательной части предлагаемого метода.

Пусть многоградационное изображение Ω задано на L-разрядной матрице A размерностью $M \times N$. Пару целых чисел (j, k), $1 \leqslant j \leqslant M$, $1 \leqslant k \leqslant N$, назовем точкой. Предполагается, что матрица подается некоторому автомату поэлементно, причем сначала последовательно слева направо предъявляются элементы первой строки, затем — второй и т. д. Обозначим через $\omega(j, k)$ значение изображения в точке (j, k), $\omega(j, k) \in \{0, 1, \ldots, L-1\}$. Последовательность вида $(i_1, j_1), \ldots, (i_s, j_s)$ такую, что $|i_k - i_{k+1}| + |j_k - j_{k+1}| < 2$, $1 \leqslant k \leqslant s$ и $\omega(i_1, j_1) = \ldots = \omega(i_s, j_s) = r$, $0 \leqslant r \leqslant L-1$, назовем путем, соединяющим точки (i_1, j_1) и (i_s, j_s). Введем отношение эквивалента «$\sim$»: $(k, l) \sim (p, q)$, если существует путь, соединяющий эти точки. Таким образом, множество всех точек изображения разбивается на непересекающиеся классы, которые будем называть связными областями, или объектами. Два объекта α и β считаются смежными, если существуют точки $(p, q) \in \alpha$, $(k, l) \in \beta$ такие, что $|p-k| + |q-l| < 2$. Определим $G(\Omega)$ (граф смежностей для изображения Ω) следующим образом: каждому объекту поставим в соответствие вершину, а пару (α, β) будем считать дугой, если объекты α и β смежные. Очевидно, что $G(\Omega)$ — неориентированный плоский граф.

Теперь сформулируем первоначальную задачу: требуется построить алгоритм, выходом которого является таблица описаний (ТО) и граф $G(\Omega)$, заданный списком дуг. В ТО каждому объекту должен соответствовать список, в котором учтены следующие характеристики: a — строка, в которой объект встретился впервые; b — строка окончания объекта; c, d — крайние левый и правый столбцы соответственно, в которых встречаются точки объекта; e — столбец начала объекта; f — столбец окончания объекта; R_x, R_y — координаты центра тяжести объекта; S — площадь (число точек, составляющих объект); T_x, T_y, T_{xy} — компоненты тензора инерции; ω — значение изображения в точках объекта; $R_x = (1/S)\sum k$; $R_y = (1/S)\sum j$; $T_x = (1/S)\sum k^2$; $T_y = (1/S)\sum j^2$; $T_{xy} = (1/S)\sum jk$ (суммирование ведется по всем (j, k), принадлежащим объекту).

Перейдем к построению алгоритма. Последовательность $S_{j,k} = (j, 1), \ldots, (j, k), (j-1, k), \ldots, (j-1, N)$ назовем (j, k)-м сечением матрицы. Заметим, что (j, k) — последняя по предъявлению точка матрицы и $S_{j,k}$ делит матрицу на предъявленную и непредъявленную части. Обозначим через $S_{j,k}(r)$ r-ю в указанном порядке точку сечения. Последовательность $S_{j,k}(r_1), \ldots, S_{j,k}(r_2)$ будем называть отрезком сечения, если существует целое число $a \in \{0, 1, \ldots, L-1\}$ такое, что для любого $r_1 \leqslant r \leqslant r_2$ $\omega(S_{j,k}(r)) = a$, $\omega(S_{j,k}(r_1 - 1)) \neq a$, $\omega(S_{j,k}(r_2 + 1)) \neq a$. Два отрезка считаются связными, если между ними существует путь, проходящий в предъявленной части матрицы. Очевидно, что все точки связных отрезков принадлежат одному объекту. Таким образом, для решения вопроса о принадлежности множества точек одному классу эквивалентности достаточно следить за связностью отрезков при переходе от сечения к сечению, а смежность объектов равносильна соседству соответствующих отрезков хотя бы в одном сечении. Введем обозначения для отрезков. Отрезок, не имеющий связи с другими отрезками в предъявленной части матрицы, обозначим через «0», первый в группе связных отрезков — через (, последний — через), а остальным присвоим символ 1. Символы отрезков в той последовательности, в которой они встречаются в сечении, образуют «слово» $H_{j,k}$. Код слова разместим в первой строке двумерного массива КС. Во вторую строку заносятся адреса отрезков, т. е. номера соответствующих столбцов в таблице ТО. Таким образом, связные отрезки имеют одинаковые адреса. Рассмотрим систему, состоящую из сече-

Таблица 1

α_l	α_l^1	α_l^2	α_l	α_l^1	α_l^2
0	(	)	(	(	1
1	1	1	)	1	)

ния $S_{j,k}$ и массивов ТО и КС. Текущим состоянием системы на i-м шаге будем считать сечение $S_{j,k}$ и состояния ТО и КС после предъявления (j, k)-й точки $(i=(j-1)N+k)$. В целях упрощения алгоритма положим $\omega(1, k)=\omega(M, k)=\omega(j, 1)=\omega(j, N)=L$, $1\leqslant k\leqslant N$, $1\leqslant j\leqslant M$. По определению, точки указанного множества не могут образовывать отрезки ни в одном из сечений, а также принадлежать какому-либо классу эквивалентности. Начальным состоянием системы является тройка ($S_{1,1}$, ТО, КС), причем ТО и КС пусты. Нужно построить переход из состояния i в $i+1$. Для этого следует рассмотреть два случая: i-му и $i+1$-му шагам в первом случае соответствуют (j, k)-я и $(j, k+1)$-я точки; во втором — точки (j, N) и $(j+1, 1)$.

В первом случае $i=(j-1)N+k$, $k<N$; для осуществления индукционного перехода достаточно рассмотреть четверку точек: $(j-1, k)$, $(j-1, k+1)$, (j, k) и $(j, k+1)$.

Сечение $S_{j,k}$ получается заменой $(j-1, k)$-й точки сечения $S_{j,k}$ на точку $(j, k+1)$ матрицы. Символы α_l, α_{l+1}, α_{l+2} будем употреблять для обозначения отрезков предыдущего сечения в порядке следования их представителей в определяющей четверке, символ γ — для отрезка, который может появиться при переходе к новому сечению. Возможны следующие комбинации значений изображения в указанных выше точках.

1. $\begin{bmatrix} a & a \\ a & b \end{bmatrix}$ — отрезок α_l распадается на два связных α_l^1 и α_l^2, между которыми вклинился новый отрезок γ, состоящий из одной точки. Установлению связей этого отрезка с другими препятствуют точки (j, k) и $(j-1, k+1)$, следовательно, $\gamma=0$. Слово $H_{j,k}=\alpha_1, \ldots, \alpha_l, \ldots, \alpha_r$ переходит в $H_{j,k+1}=\alpha_1, \ldots, \alpha_l^1, 0, \alpha_l^2, \ldots, \alpha_r$. Зависимость α_l^1 и α_l^2 от α_l представлена в табл. 1.

2. $\begin{bmatrix} a & a \\ b & c \end{bmatrix}$ — $H_{j,k}=\alpha_1, \ldots, \alpha_l, \alpha_{l+1}, \ldots, \alpha_r$ переходит в $H_{j,k+1}=\alpha_1, \ldots$ $\ldots, \alpha_l, \gamma, \alpha_{l+1}, \ldots, \alpha_r$; γ, как и в предыдущем случае, равно 0.

3. $\begin{bmatrix} a & b \\ a & c \end{bmatrix}$ — аналогично 2.

4. $\begin{bmatrix} a & a \\ b & b \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} a & a \\ b & a \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} a & b \\ a & b \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} a & a \\ a & a \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} a & b \\ a & a \end{bmatrix}$ — при таких комбинациях значений $H_{j,k+1}=H_{j,k}$.

5. $\begin{bmatrix} a & b \\ c & b \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} a & b \\ c & c \end{bmatrix}$ — отрезок α_{l+1}, состоящий из одной точки в предыдущем сечении, отсутствует в новом. В зависимости от значения α_{l+1} слово может измениться:

а) $\alpha_{l+1}=0$, $\alpha_{l+1}=1$ — связи между отрезками не нарушаются;

б) $\alpha_{l+1}=($ — нужно найти ближайший связный с ним справа отрезок (т. е. с таким же адресом) и заменить 1 на (или) на 0;

в) $\alpha_{l+1}=)$ — необходимо найти ближайший слева связный с ним отрезок и заменить 1 на) или (на 0. Заметим, что если $\alpha_{l+1}=0$, то отрезок не связан с остальными и соответствующий ему объект предъявлен полностью.

6. $\begin{bmatrix} a & b \\ b & a \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} a & b \\ c & a \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} a & b \\ b & c \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$ — отрезок α_{l+1} исчезает, вместо него появляется новый отрезок γ. В этом случае действия аналогичны пп. 1 и 5.

Таблица 2

N	α_l	α_{l+2}	γ	Изменения в остальных символах
1	0	β	β	Изменений нет
2	β	0	β	
3	(	1	(	
4	1	)	)	
5	1	1	1	
6	(	)	0	
7	)	(	1	
8	(	(	(	Символ), отвечающий α_l, заменить на 1
9	1	(	1	
10	)	1	1	Символ (, отвечающий α_l, заменить на 1
11	)	)	)	

7. $\begin{bmatrix} a & b \\ b & b \end{bmatrix}$ — α_{l+1} исчезает, отрезки α_l и α_{l+2} сливаются в один отрезок γ. Все перечисленные комбинации сведены в табл. 2.

Для удобства описания действия над массивом ТО разобьем на шесть блоков.

1. S_1 — появление нового отрезка. Объекту, отвечающему новому отрезку, следует выделить очередной свободный столбец в ТО и произвести в нем начальные присвоения: $a=j$; $c=d=e=k+1$; $S=1$; $R_x=k+1$; $R_y=j$; $T_x=(k+1)^2$; $T_y=j^2$; $T_{xy}=j(k+1)$.

2. S_2 — исчезновение отрезка. В том случае, когда код исчезнувшего отрезка равен 0, соответствующий объект предъявлен полностью, и информацию о нем можно вывести на внешний носитель: $\omega=a$, $b=j-1$, $f=k$, $R_x=R_x/S$, $R_y=R_y/S$, $T_x=T_x/S$, $T_y=T_y/S$, $T_{xy}=T_{xy}/S$. Остальные характеристики выводятся без изменений.

3. S_3 — слияние двух отрезков. Если эти отрезки были связаны в старом сечении, то к объекту, на который указывает их общий адрес, следует применить блок S_4. В противном случае один из столбцов нужно выбрать результирующим и занести в него суммарную информацию о получившемся объекте: $a=\min(a_1, a_2)$, $c=\min(c_1, c_2)$, $d=\max(d_1, d_2)$, если $a_1=a_2$, то $e=\min(e_1, e_2)$, иначе если $a=a_i$, то $e=e_i$, $S=S_1+S_2$, $R_x=R_{x_1}+R_{x_2}+k+1$, $R_y=R_{y_1}+R_{y_2}+j$, $T_x=T_{x_1}+T_{x_2}+(k+1)^2$, $T_y=T_{y_1}+T_{y_2}+j^2$, $T_{xy}=T_{xy_1}+T_{xy_2}+j(k+1)$.

4. S_4 — добавление точки $(j, k+1)$. В соответствующем столбце нужно изменить следующие характеристики: $S=S+1$, $R_x=R_x+k+1$, $R_y=R_y+j$, $T_x=T_x+(k+1)^2$, $T_y=T_y+j^2$, $T_{xy}=T_{xy}+j(k+1)$.

5. C — коррекция номера крайнего левого столбца: $c=\min(c, k+1)$.

6. D — коррекция номера крайнего правого столбца: $d=\max(d, k)$.

В указанных обозначениях действия над ТО сведены в табл. 3. В первой строке размещены значения изображения на определяющей четверке, во второй — отрезки, по адресам которых нужно производить изменения, в третьей — дан характер этих изменений и в четвертой — пары отрезков, адресами которых следует пополнить список дуг графа G.

Во втором случае $i=M(j-1)+N$. Не меняя состояния КС и ТО, перейдем к следующему шагу, вернувшись в начало массива КС.

Таблица 3

Значение на определяющей четверке	Изменения по адресу	Характер изменений	Занесение в G (Ω)
$a\ a$ $a\ b$	γ	S_1	(α_l, γ)
$a\ a$ $b\ c$	γ	S_1	(α_l, γ) (α_{l+1}, γ)
$a\ b$ $a\ c$	α_{l+1}, γ	C, S_1	(α_l, γ) (α_{l+1}, γ)
$a\ a$ $b\ b$	α_l	S_4	Нет
$a\ a$ $a\ a$			
$a\ b$ $c\ c$	$\alpha_l, \alpha_{l+1}, \alpha_{l+2}$	S_4, S_2, D, C	(α_l, α_{l+2})
$a\ b$ $c\ b$	$\alpha_{l+1}, \alpha_{l+2}$	D, S_2, S_4	(α_l, α_{l+1})
$a\ b$ $b\ a$	$\alpha_{l+1}, \alpha_{l+2}, \gamma$	D, S_2	$(\alpha_l, \gamma)(\alpha_{l+2}, \gamma)$
$a\ b$ $c\ a$			
$a\ b$ $b\ c$			
$a\ b$ $c\ d$			
$a\ b$ $b\ b$	α_{l+1}, γ	S_1, S_3	*
$a\ a$ $b\ a$	α_{l+1}	S_4	Нет
$a\ b$ $a\ b$			

Примечание. В G заменить адреса α_l и α_{l+2} на адрес γ и удалить дуги, встречающиеся дважды.

С приходом последней строки все объекты требуется предъявить полностью, т. е. их описание и граф смежности должны быть выведены на внешний носитель. Доказательство правильности индукционного перехода не приводится из-за его очевидности.

Для приведенного алгоритма наиболее сложной по объему оперативной памяти является обработка изображения, представляющего собой шахматную доску размерностью $M \times N$. В этом случае число столбцов, необходимых для массивов КС и ТО, а также число дуг графа G максимально. Поэтому для работы алгоритма на произвольном изображении необходимо отвести $2(N-2)$ ячеек для КС, $13(N-2)$ ячеек для ТО и $2MN-5(M+N)+12$ ячеек для графа G. Следует подчеркнуть, что дуги графа можно выводить на внешний носитель сразу же по их появлении, а общее число объектов произвольного изображения не превосходит $(M-2)(N-2)$.

друг с другом. Так как $G(\Omega)$ — плоский граф, то его (следовательно, и исходное изображение) можно перекрасить не более чем в пять цветов. При этом вся информация о геометрических свойствах объектов и их взаимном расположении сохраняется, что является достаточным для решения многих задач обработки изображений. Объем памяти, необходимый для записи исходного изображения при $L = 256$, сокращается после перекрашивания в 2—4 раза. К сожалению, в общем случае алгоритмы минимальной раскраски плоских графов обладают высокой сложностью, что затрудняет их реализацию на ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Розенфельд А.** Распознавание и обработка изображений с помощью вычислительных машин.— М.: Мир, 1972.
2. **Сидорова В. С.** Об одном алгоритме обработки многоспектральных аэрокосмических изображений.— В кн.: Развитие и использование аэрокосмических методов изучения природных явлений и ресурсов. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1979.
3. **Дробышев Ю. П., Одеянко Б. П.** Анализ изображения и его модели.— Там же.
4. **Хюккель М.** Оператор нахождения контуров на кодированных изображениях. Интегральные роботы.— М.: Мир, 1973.

Поступила в редакцию 14 сентября 1982 г.;
окончательный вариант — 16 августа 1983 г.

УДК 621.382 : 621.391 : 681.32.05

А. О. БАКРУНОВ, И. В. ЩУКИН
(Москва)

МЕТОДЫ ПРОВЕРКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ТОЧЕЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИИ АЛГОРИТМОВ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ

Введение. Решение ряда задач анализа структуры изображений существенно упрощается при использовании точечных моделей структуры изображений в сочетании с пространственно-спектральными методами [1—4]. Для проверки и испытаний алгоритмов анализа структуры изображений нами применяется специально разработанная система цифрового моделирования МСИ-78, включающая следующие основные компоненты [5]: 1) генератор точечных моделей* (на рис. 1 приведено изображение, полученное с помощью этого генератора); 2) пространственно-спектральный блок, позволяющий вычислять преобразование Фурье для точечных моделей; 3) блок регистрации, дающий возможность вычислить интенсивность пространственного спектра при различных вариантах съема информации (см. рис. 2); 4) блок анализа, с помощью которого можно дешифрировать структуру пространственного спектра и выявлять характерные особенности изображения.

В работе изложен способ генерирования многомерных псевдослучайных точечных изображений, а также методы проверки их статистических

* Система МСИ-78 может работать также с внешней точечной моделью, которая формируется самим пользователем, генератор точечных моделей в этом случае отключается.