

ЛИТЕРАТУРА

1. Бендич Н. Н. Об одном алгоритме адаптивной стабилизации // Автометрия.— 1980.— № 3.
2. Бендич Н. Н., Кондратьев В. В. Один подход к максимизации функции вероятности в задачах стабилизации // Приближенные методы решений операторных уравнений и их приложения.— Иркутск: СО АН СССР, 1982.
3. Поляк Б. Т., Цыпкин Я. З. Робастные псевдоградиентные алгоритмы адаптации // АИТ.— 1980.— № 10.

УДК 519.68 : 007.52

О. А. БАШКИРОВ, Ю. Г. ВАСИН, С. Б. РУДОМЕТОВА

(Горький)

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СТРУКТУРИРОВАННОГО ОПИСАНИЯ ГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В работе рассматриваются математические модели структурированного описания сложных графических изображений типа карт, чертежей, схем и т. п. Предложены контурная и линейно-контурная модели описания, рассмотрены алгоритмы построения моделей, способы представления их в памяти ЭВМ и возможности применения для решения задач обработки и распознавания.

Основные понятия. Бинарным изображением будем называть прямоугольную матрицу (растр) $\{a_{i,j}\}$, где

$$a_{i,j} = 0, 1; \quad 1 \leq i \leq n; \quad 1 \leq j \leq n.$$

Для записи растра используем более экономичную форму: «штрихи» или «хорды» [1]. Штрих есть тройка (x_n, x_k, y) , где

$$(x_n = j_1) \wedge \bar{a}_{i,j_1-1} \wedge a_{i,j_1}; \quad (x_k = j_2) \wedge a_{i,j_2} \wedge \bar{a}_{i,j_2+1}; \quad y = i,$$

т. е. штрих задает последовательность единичных («черных») клеток в строке растра; x_n — номер первой клетки последовательности; x_k — номер последней клетки.

Определим контур связной фигуры в штриховой форме [1] следующим образом. Рассмотрим всевозможные варианты расположения штрихов в двух соседних строках растра и найдем для каждого из них предыдущую и последующую точки контура так, чтобы «черное» оставалось справа. Все варианты сводятся к восьми, изображенным на рис. 1. Последовательность предыдущих и последующих точек контура образует контур, всегда замкнутый, без пересечений и разветвлений, что следует из определения. Контур может быть внешним (упорядочен по часовой стрелке) и внутренним (против часовой стрелки).

Под математической моделью изображения будем понимать тройку $M = (E, R, O)$, где E — множество производных элементов $\{e_i\}$; R — множество отношений между производными элементами $\{r_j\}$; O — множество объектов модели $\{o_k\}$.

Контурная модель изображения. Пусть $K = \{x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n\}$ — последовательность точек контура связной фигуры. Тогда контурная модель изображения $KM = (E_1, R_1, O_1)$ [2, 3] состоит из производ-

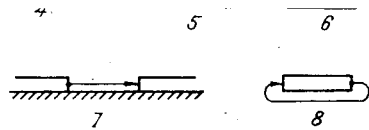


Рис. 1

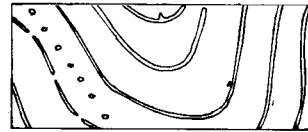


Рис. 2

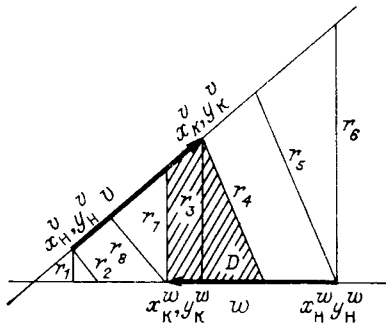


Рис. 3

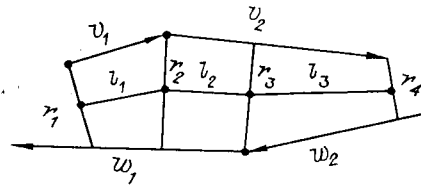


Рис. 4

ного элемента $e_1 = (x_t^H, y_t^H, x_t^K, y_t^K)$ — вектора контура, отношения

$$r_1: V_t \{ (x_t^K = x_{t+1}^K) \wedge (y_t^K = y_{t+1}^K) \wedge (x_t^H = x_{t-1}^H) \wedge (y_t^H = y_{t-1}^H) \}$$

(каждый вектор примыкает к предыдущему и последующему векторам) и объектов o_k — замкнутых контуров, образованных последовательностями векторов.

Контурная модель рассматривается в основном как подготовительный этап к построению линейно-контурной модели, наряду с этим существуют графические объекты (изолированные цифры, буквы, условные знаки), для которых контурная модель имеет самостоятельное значение. Пример контурного представления изображения приведен на рис. 2.

Линейно-контурная модель изображения. Основным понятием линейно-контурной модели изображения [2, 3] является «линия», которая определяется через понятие «противоположного вектора».

Пусть $v(x_n^v, y_n^v, x_k^v, y_k^v)$, $w(x_n^w, y_n^w, x_k^w, y_k^w)$ — пара векторов контурной модели изображения. Будем называть v и w противоположными (рис. 3), если выполняются следующие условия. Опустим из точки x_n^v, y_n^v (начало вектора v) перпендикуляры $r_1 \perp w$ и $r_2 \perp v$ на прямую, заданную вектором w , затем аналогичные перпендикуляры построим из точек (x_k^v, y_k^v) , (x_n^w, y_n^w) , (x_k^w, y_k^w) . Среди полученных восьми перпендикуляров отберем те, концы которых принадлежат v или w , при этом, если условие принадлежности конца выполнено для двух перпендикуляров, опущенных из одной точки, берется один из них (любой, например, r_4 и r_7 на рис. 3). Эти перпендикуляры называются рабочими.

Векторы v и w называются противоположными, если: 1) число рабочих перпендикуляров ≥ 2 ; 2) направление v и w соответствует обходу по часовой стрелке области D , ограниченной отрезками v , w и рабочими перпендикулярами; 3) в области D нет других векторов; 4) длина рабочих перпендикуляров $\leq l_{\max}$.

Пусть v_1, v_2, \dots, v_n ; w_1, w_2, \dots, w_m — последовательности противоположных векторов, связанных отношениями примыкания; r_1, r_2, \dots, r_{n+m} — рабочие перпендикуляры этих векторов; $l_1, l_2, \dots, l_{n+m-1}$ —

векторы (отрезки прямых), соединяющие середины r_i (рис. 4). Тогда условие существования начального участка имеет вид

$$\sum_{i=1}^{n+m} r_i - \min_{1 \leq i \leq m+n} (r_i) \leq \alpha \sum_{i=1}^{n+m-1} l_i; \quad (1)$$

$$(n+m-1) \max_{1 \leq i \leq m+n} (r_i - \min(r_i)) \leq \beta \sum_{i=1}^{n+m-1} l_i,$$

где α и β — константы, задающие точность выполнения условия. Смысл (1) состоит в том, что начальный участок линии должен иметь «длину» больше «толщины», при этом «толщина» не должна сильно меняться.

Если (1) выполнено, то последовательности $\{v_i\}$, $\{w_i\}$ заменим последовательностью векторов линии $\{l_i\}$, при этом толщина линии $h =$

$$= \frac{1}{n+m} \sum_{i=1}^{m+n} r_i. \text{ Аналогично вводится условие прослеживания линии,}$$

контролирующее допустимые изменения толщины [2, 3].

Таким образом, линия есть фрагмент связной фигуры, для которого хотя бы один раз выполняется условие начального участка линии (1) и везде выполняется условие прослеживания линии.

Линейно-контурная модель изображения ЛКМ $= (E_2, R_2, O_2)$ состоит из:

$$E_2 = \{e_1, e_2, e_3, e_4\},$$

где $e_1 = (x_n^{l_i}, y_n^{l_i}, x_k^{l_i}, y_k^{l_i})$ — вектор линии; $e_2 = (x_n^{v_j}, y_n^{v_j}, x_k^{v_j}, y_k^{v_j})$ — вектор контура; $e_3 = (x^p, y^p)$ — изолированная черная точка на белом фоне; $e_4 = (x^q, y^q)$ — на черном фоне;

$$R_2 = \{r_1, r_2\},$$

$$\text{где } r_1 : \vee_i \left(\left(\left(\left(x_k^{l_i} = x_n^{l_{i+1}} \right) \wedge \left(y_k^{l_i} = y_n^{l_{i+1}} \right) \right) \vee \left(\left(x_n^{l_i} = x_k^{l_{i-1}} \right) \wedge \left(y_n^{l_i} = y_k^{l_{i-1}} \right) \right) \right) \vee \right. \\ \left. \vee \left(\left(\left(x_k^{l_i} = x_n^{v_j} \right) \wedge \left(y_k^{l_i} = y_n^{v_j} \right) \right) \wedge \left(\left(x_n^{l_i} = x_k^{v_{j+1}} \right) \wedge \left(y_n^{l_i} = y_k^{v_{j+1}} \right) \right) \right) \vee \lambda \right); \quad (2)$$

$$r_2 : \vee_j \left(\left(\left(\left(\left(x_n^{v_j} = x_k^{v_{j+1}} \right) \wedge \left(y_n^{v_j} = y_k^{v_{j+1}} \right) \right) \wedge \left(\left(x_n^{v_j} = x_k^{v_{j-1}} \right) \wedge \left(y_n^{v_j} = y_k^{v_{j-1}} \right) \right) \right) \right) \vee \right. \\ \left. \vee \left(\left(\left(x_k^{v_j} = x_n^{l_i} \right) \wedge \left(y_k^{v_j} = y_n^{l_i} \right) \right) \vee \left(\left(x_k^{v_j} = x_n^{l_i} \right) \wedge \left(y_k^{v_j} = y_n^{l_i} \right) \right) \right); \quad (3)$$

λ — пустой символ; $O_2 = \{l_i, k_j, p_n, q_s\}$, где l_i — линии, образованные последовательностями векторов линий; k_j — контуры, образованные последовательностями векторов контуров; p_n, q_s — черные и белые изолированные точки (совпадают с e_3, e_4).

Условия (2) означают, что вектор линии может примыкать к другому вектору линии, вектору контура или не примыкать ни к какому другому вектору (свободный конец линии). Если вектор линии примыкает к контуру, то образуется точка примыкания, общая для вектора линии и двух векторов контура.

Условия (3) означают, что вектор контура всегда примыкает к предыдущему и последующему векторам контура (контуры замкнуты) и может примыкать к вектору линии в точке примыкания.

Изолированная черная точка есть внешний контур без точек примыкания, размер которого сравним с параметром точности аппроксимации. Аналогично белая точка есть малый внутренний контур без точек примыкания.

В целом процедура преобразования КМ и ЛКМ состоит в том, что ко всем контурам применяются условия линии и точки. Там, где условия выполняются, формируются соответствующие объекты, при этом сохраняется замкнутость контуров. Примеры представления изображений в ЛКМ приведены на рис. 5, 6.

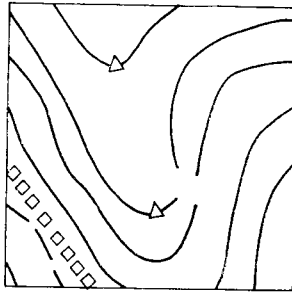


Рис. 5

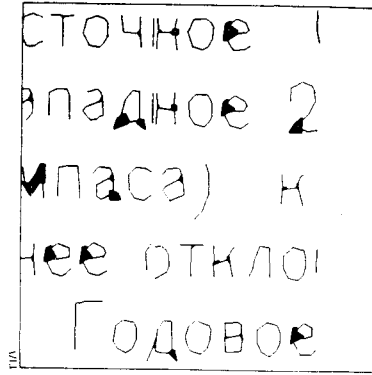


Рис. 6

Таким образом, построена полностью формальная последовательность преобразований: растр \rightarrow множество связанных фигур \rightarrow множество контуров \rightarrow множество существенных отсчетов \rightarrow множество структурных элементов КМ \rightarrow КМ \rightarrow множество структурных элементов ЛКМ \rightarrow ЛКМ.

Алгоритмы построения и обработки ЛКМ. Большая часть практически важных видов графических документов (карты, чертежи, схемы) характеризуется крайне большим объемом информации в растровом представлении — 10^8 – 10^9 бит и более.

В данной статье эта проблема решается путем выполнения наиболее трудоемких операций построения ЛКМ в режиме совмещения со сканированием и эффективной организации преобразований ЛКМ.

Возможности эффективной реализации алгоритмов существенно зависят от структур данных. Для представления ЛКМ используется:

1) список $S(x_i^t, y_i^t, a_i^t, b_i^t, c_i^t, m_i^t)$, где x_i^t, y_i^t — координаты точки; a_i^t — адрес связи в прямом направлении; b_i^t — в обратном направлении; c_i^t — адрес противоположного вектора; m_i^t — маркер типа точки (контур, линия, точка примыкания и т. д.).

2) линейный массив с паспортами $LM = (P, M)$, состоящий из двух подмассивов: подмассива паспортов P и подмассива метрики M .

Паспорт имеет вид $p_i(a_i, l_i, t_i, n_i, p_{i_1}, \dots, p_{i_h})$, где a_i — адрес записи метрики; l_i — длина записи метрики; t_i — тип объекта (контур, линия, изолированная точка); n_i — номер объекта; p_{i_1}, \dots, p_{i_h} — дополнительные характеристики: координаты описанного прямоугольника, толщина линии, площадь контура и т. п. Метрика M есть множество пар координат линий и контуров x_j, y_j .

Связи между объектами ЛКМ хранятся в таблице примыканий, содержащей номера объектов и координаты точек примыкания.

Подробное изложение алгоритмов невозможно из-за ограниченного объема работы (подробнее см. [2, 3]). Общая схема построения модели состоит в том, что операции вычисления связности, аппроксимации, обнаружения и прослеживания линий и формирования точек примыкания выполняются в процессе сканирования, параллельно для всех прослеживаемых линий и контуров. Для управления этим процессом создан буфер линий и контуров, динамически пополняемый и освобождаемый по мере появления новых и окончания обработки объектов изображения. Однако в процессе сканирования трудно обработать участки линий, близкие по направлению к линии сканирования. Такие участки остаются в виде контуров, для которых вычислены адреса связи противоположных векторов. Эти участки обрабатываются на следующем проходе алгоритма, в результате чего получается ЛКМ в виде списка. Вычислительная сложность всех алгоритмов этого типа практически близка к $O(n)$. Затем

список преобразуется в линейный массив с паспортами. Алгоритм преобразования построен по принципу «разделяй и властвуй» и имеет вычислительную сложность, близкую к $O(n \log n)$.

Рассмотрим некоторые возможности решения задач обработки графической информации на основе ЛКМ. Как вытекает из структуры ЛКМ, задачи выделения, распознавания и измерения графических объектов сводятся к задачам вычисления на множестве ломаных, многоугольников и точек, т. е. к задачам быстро развивающейся в настоящее время области вычислительной геометрии [4]. Отметим здесь, что предложенное в [5, 6] иерархическое многоуровневое представление информации позволяет уменьшить вычислительную сложность многих задач вычислительной геометрии.

Алгоритмы построения ЛКМ прошли длительную экспериментальную проверку. Эксперименты проводились с растровым сканирующим устройством ввода барабанного типа, имеющим рабочее поле 500×700 мм, дискретность 0,04 мм и скорость 300 строк/мин.

ЛКМ рассматривается как базовая математическая модель изображения, предназначенная для решения широкого класса задач автоматической обработки графической информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башкиров О. А., Салмин С. П., Чудинович Б. М. О приложениях последовательной обработки данных к анализу изображений // *Авт.*— 1977.— № 12.
2. Васин Ю. Г., Башкиров О. А., Рудометова С. Б. Математические модели структурированного описания графических изображений // *Автоматизация обработки сложной графической информации.*— Горький: ГГУ, 1984.
3. Васин Ю. Г., Башкиров О. А., Чудинович Б. М. Математическая модель и алгоритмическое обеспечение обработки растрового графического изображения // *Труды Международн. симп. по искусственному интеллекту (ISAI) (Ленинград 4—6 октября 1983).*— Л.: IFAC, IFIP, 1983.
4. Preparata F. P., Shamos M. I. *Computational Geometry.*— N. Y.: Springer-Verlag, 1985.
5. Васин Ю. Г. Оптимизация описания исходных данных в диалоговых системах решения задач классификации // *Современное состояние теории исследования операций.*— М.: Наука, 1979.
6. Васин Ю. Г. Хорошо приспособленные базисы и задачи обработки экспериментальной информации: Учебное пособие.— Горький: ГГУ, 1979.

Поступила в редакцию 3 февраля 1987 г.

УДК 621.391 : 681.84

В. В. ПОСПЕЛОВ

(Москва)

ОБ ОДНОМ ЧИСЛЕННОМ МЕТОДЕ КОРРЕКЦИИ КОНТРАСТА ИЗОБРАЖЕНИЙ

В области цифровой обработки изображений имеется ряд эвристических методов, не имеющих пока достаточного теоретического обоснования. Целенаправленные исследования этих методов важны сами по себе. Но не менее важно то, что эти исследования помогают глубже понять задачи обработки изображений и установить полезные связи с другими областями науки. Так, благодаря исследованию задачи коррекции контраста обнаружилась ее связь с моделированием случайных процессов.