

4. Ищенко Л. А., Руденко О. Г. Многошаговые адаптивные алгоритмы идентификации линейных объектов // Автометрия. — 1983. — № 6.
5. Ищенко Л. А., Либероль Б. Д., Руденко О. Г. Проекционные алгоритмы идентификации линейных объектов // ДАН УССР. Сер. А. — 1985. — № 7.
6. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. — М.: Мир, 1980.

Поступила в редакцию 18 декабря 1984 г.

УДК 681.142.523

Ю. И. ТОРМЫШЕВ

(Минск)

ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Введение. Развитие систем искусственного интеллекта и необходимость построения роботизированных систем привели к необходимости образного представления мира, которое в ряде случаев можно свести к проблеме анализа сцен, попадающих в поле зрения анализирующей системы [1]. Любое квантованное изображение сцены может быть представлено как совокупность линий, разграничивающих области с одинаковыми уровнями яркости. Каждому уровню яркости в шкале квантования соответствует некоторый набор линий уровня, определяющих в общей сложности изображение. Анализ линий уровня и контуров, полученных при анализе изображения, позволяет выделить признаки, достаточные в ряде случаев для распознавания тех или иных фигур в анализируемом изображении. Этот подход получил название лингвистического или структурного [2—4]. Его сущность состоит в использовании для анализа структуры изображения хорошо разработанного аппарата контекстно независимых или формальных грамматик ввиду наличия в ряде случаев аналогии между структурой изображения и лингвистическими конструкциями. Основная трудность использования аппарата формальных грамматик применительно к анализу изображений заключается в трудности выделения из структуры изображения словаря непроеизводных элементов [2, 3], с помощью которого реализуются те или иные синтаксические конструкции.

Одним из наиболее известных методов описания анализируемых изображений структурой языкового типа является метод цепных кодов [1—3]. Его недостаток — высокая избыточность информации, затрудняющая анализ исходного описания. Известны и другие методы описания изображений [1, 5], но они либо сложны, либо не приспособлены для лингвистического анализа. В работе предлагается способ выделения словаря непроеизводных элементов, свободных от указанных недостатков.

Постановка задачи. Пусть в результате отслеживающего преобразования и квантования графического изображения формируются унитарные кодовые последовательности $(\Delta X_i, \Delta Y_j) \in \{0, 1\}$, $(i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m})$, описывающие некоторый объект. Необходимо найти непроеизводные линейные элементы, последовательность которых и составляет кодовое описание считываемого изображения.

Вопрос решается в такой последовательности. Сначала решается задача кусочно-линейной аппроксимации анализируемого изображения, затем осуществляется формирование непроеизводных элементов путем распределения формируемых векторов по векторам фиксированных направлений и вычисление их длин. После этого составляется кодовое описание анализируемого объекта.

Кусочно-линейная аппроксимация изображений. Кодирование линий уровня представляет довольно сложный процесс [6]. Из известных методов представления линий отрезками прямых можно отметить метод,

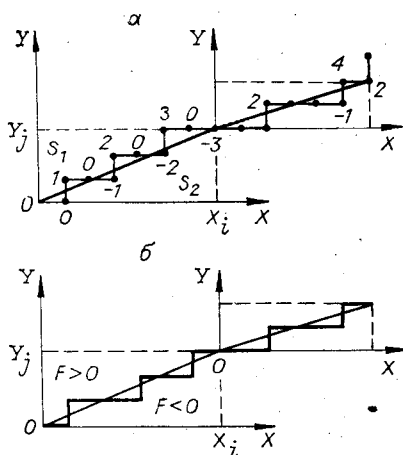


Рис. 1. Кусочно-линейная аппроксимация (а) и восстановление (б) квантовых изображений:
цифры — значения функции рассогласования

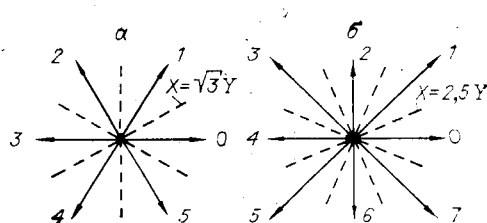


Рис. 2. Разбиение векторной плоскости на шесть (а) и восемь (б) секторов:
штриховыми линиями показаны границы раздела секторов, цифрами — номера векторов фиксированных направлений

основанный на вычислении допустимой величины отклонения вектора от своего первоначального положения [7]. Известен и ряд других методов [1, 5], основным недостатком которых является сложность аппаратной реализации или большой объем вычислений. Сущность одного из методов, свободного от указанных недостатков, состоит в вычислении функции рассогласования, определяемой как разность площадей S_1 и S_2 (рис. 1, а), заключенных между отслеживаемой линией, одной из осей координат и прямой, проведенной из текущей точки перпендикулярно соответствующей оси координат.

Значение функции рассогласования F_1 , формируемое при обработке элементарных единичных приращений ΔX_i и ΔY_j , определяется в соответствии с выражением

$$F_1 = S_1 - S_2 = \begin{cases} F_1 - |Y_j|, & \text{если } |\Delta X_i| = 1; \\ F_1 + |X_i|, & \text{если } |\Delta Y_j| = 1, \end{cases} \quad (1)$$

где $X_i = \sum_i \Delta X_i$ и $Y_i = \sum_j \Delta Y_j$ — текущие значения относительных координат формируемого вектора, совпадающие с координатами считывающего элемента. Значение функции рассогласования в начальной точке принимается равным нулю.

В соответствии с выражением (1) каждое из единичных приращений меняет значение функции рассогласования. В процессе обработки поступающих приращений определяется их принадлежность к формируемому вектору согласно выражению

$$XY = \begin{cases} X_{i-1} + \Delta X_i, & \text{если } \Delta X_i = 1 \text{ и } F_1 \geq 0; \\ Y_{j-1} + \Delta Y_j, & \text{если } \Delta Y_j = 1 \text{ и } F_1 \leq 0. \end{cases} \quad (2)$$

При нарушении одного из условий выражения (2) или изменении знака производной любой из координат вектор считается сформированным и начинается формирование следующего вектора. Последовательность таких векторов образует цифровую модель графического изображения. Каждому вектору модели в момент окончания его формирования присваивают накопленные к этому времени значения относительных координат. В результате подобной обработки вместо входного множества дискретных отсчетов, получаемых в процессе отслеживания, находим выходное множество отсчетов меньшей мощности, т. е. происходит сжатие информации за счет удаления из входного множества избыточных компонентов.

Погрешность кусочно-линейной аппроксимации рассмотренного алгоритма не превышает величины $\sqrt{2}$ элементарного приращения. Она мо-

жет быть уменьшена, если в момент завершения формирования вектора выполнить коррекцию на один шаг назад. Каждое поступающее приращение обрабатывается за один такт, т. е. обработка информации осуществляется в реальном времени.

Цифровую модель можно использовать для восстановления исходного квантованного изображения. С этой целью значения координат полученных векторов используют для формирования начальных значений функции рассогласования $F_2 = 0,5(X - Y)$. Текущие приращения координат восстанавливаемого изображения формируют в соответствии с выражением

$$(\Delta X, \Delta Y) = \begin{cases} \Delta X = 1, & \text{если } F_2 \geq 0; \\ \Delta Y = 1, & \text{если } F_2 < 0, \end{cases}$$

до тех пор, пока по каждой из координат не будет отработано заданное число шагов. Каждое приращение в процессе восстановления изображения изменяет значение функции рассогласования в соответствии с выражением

$$F_2 = \begin{cases} F_2 - Y, & \text{если } \Delta X = 1; \\ F_2 + X, & \text{если } \Delta Y = 1. \end{cases}$$

На рис. 1, б показано восстановленное с помощью полученных выражений изображение.

Значения координат сформированных векторов используются в дальнейшем для определения их принадлежности к одному из векторов фиксированных направлений.

Формирование векторов фиксированных направлений. Рассмотрим принцип формирования на примере разбиения векторной плоскости в соответствии с рис. 2, а на шесть секторов, границами которых являются векторы фиксированных направлений. Для этого проведем биссектрису угла в первом секторе и будем считать, что все векторы, соединяющие начало координат с любой точкой, лежащей ниже биссектрисы, будут принимать значение вектора 0, а векторы, соединяющие начало координат с любой точкой, лежащей выше на границе раздела сектора, примут значение вектора 1. Уравнение биссектрисы первого сектора определяется выражением $X = \sqrt{3}Y$. Используя его, запишем приведенное к первому квадранту правило определения принадлежности любого вектора с координатами X и Y к одному из векторов фиксированных направлений

$$XY_1 = \begin{cases} 0, & \text{если } \sqrt{3}|Y| - |X| < 0; \\ 1, & \text{если } \sqrt{3}|Y| - |X| \geq 0. \end{cases} \quad (3)$$

Тогда обобщенное правило определения принадлежности векторов с учетом выражения (3) и знаков проекций векторов на координатные оси запишется следующим образом:

$$XY = \begin{cases} 0, 3, & \text{если } XY_1 = 0 \text{ и } X > 0, X < 0 \text{ соответственно;} \\ 1, 2, 4, 5, & \text{если } XY_1 = 1 \text{ и } (X > 0, Y > 0), (X < 0, Y > 0), \\ & (X < 0, Y < 0), (X > 0, Y < 0) \text{ соответственно.} \end{cases} \quad (4)$$

Полученные выражения (3) и (4) можно использовать для описания гексагональных структур.

Наиболее употребимым в технике формирования изображений является представление линий векторами восьми фиксированных направлений. Это связано с тем, что большое число чертежей и схем состоит из вертикальных, горизонтальных и под углом 45° к осям координат линий.

Используя описанный подход, можно получить правила описания изображений с использованием алфавита, состоящего из векторов восьми фиксированных направлений (рис. 2, б). Так, для биссектрисы первого сектора можно записать выражение $(Y/X) = 0,4142$.

Поскольку в большинстве случаев вычисления являются приближенными, то с целью удобства их выполнения осуществим округление углового коэффициента, в результате получим $X = 2,5Y$. Используя это выражение в качестве границы разделения сектора на две части и учитывая симметрию относительно вектора 1, запишем приведенное к первому квадранту правило определения принадлежности вектора с координатами X и Y к одному из векторов фиксированных направлений:

$$XY = \begin{cases} 0, & |X| > |Y| \text{ и } 2,5|Y| - |X| < 0; \\ 1, & |X| > |Y| \text{ и } 2,5|Y| - |X| \geq 0; \\ 2, & |X| < |Y| \text{ и } 2,5|X| - |Y| < 0; \\ 4, & |X| < |Y| \text{ и } 2,5|X| - |Y| \geq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Используя выражение (5), симметрию диаграммы (см. рис. 2, б) и знаки проекций вектора, получим правило определения номера вектора XY в любом из квадрантов: $0 \rightarrow 0$, если $X > 0$; $0 \rightarrow 4$, если $X < 0$; $2 \rightarrow 2$, если $Y > 0$; $1 \rightarrow 3$, если $X < 0$ и $Y > 0$; $1 \rightarrow 5$, если $X < 0$ и $Y < 0$; $1 \rightarrow 7$, если $X > 0$ и $Y < 0$.

Обычно в практике формирования изображений используют системы векторов, совпадающие с осями координат и обладающие осевой и диагональной симметрией. В этом случае для числа векторов в квадранте, равном $n = (90/\alpha) \geq 2$, где α — угол между векторами, можно записать следующее обобщенное выражение для определения векторов фиксированных направлений:

$$XY_1 = \begin{cases} i, & \text{если } \sup(k_i |Y| - |X|) < 0 \text{ и } |X| > |Y|, i = \overline{0, (0,5n-1)}, i = \overline{0, (n-1)/2}; \\ n - i, & \text{если } \sup(k_i |X| - |Y|) < 0 \text{ и } |Y| \geq |X|, i = \overline{0, (0,5n-1)}, i = \overline{0, (n-1)/2}; \\ 0,5n, & \text{если } k_i \min(|X|, |Y|) \geq \max(|X|, |Y|), i = \overline{0,5n}, \end{cases} \quad (6)$$

$$XY = \begin{cases} XY_1, & \text{если } X \geq 0, Y \geq 0; \\ 2n - XY_1, & \text{если } X < 0, Y \geq 0; \\ 2n + XY_1, & \text{если } X < 0, Y < 0; \\ 4n - XY_1, & \text{если } X \geq 0, Y < 0, \end{cases} \quad (7)$$

где цифрами и фигурными скобками обозначены условия для четного и нечетного числа секторов в квадранте; $k_i = \operatorname{ctg} \alpha (i + 0,5)$.

Используя выражения (5) — (7) для выбранной системы векторов по значениям знаков и величин проекций формируемого с помощью выражений (1) и (2) вектора, можно определить его принадлежность к одному из векторов фиксированных направлений. Последовательность таких векторов и будет определять логическое описание фигуры в терминах производных элементов с учетом начальной фазы, направления обхода и углового положения на координатной плоскости. Использование системы с большим количеством векторов обеспечивает более высокую разрешающую способность по угловому параметру. Точность представления элементов изображения по угловому параметру составляет $\pm 0,5\alpha$.

Описание и анализ изображений, представленных векторами фиксированных направлений. Будем считать, что все векторы, полученные при считывании, являются значимыми. Тогда любое из отслеживаемых и обрабатываемых описанным образом изображений может быть представлено списком, состоящим из набора сформированных векторов.

Важное свойство описываемых фрагментов изображений — замкнутость. Наличие этого признака позволяет выделить в отдельный класс

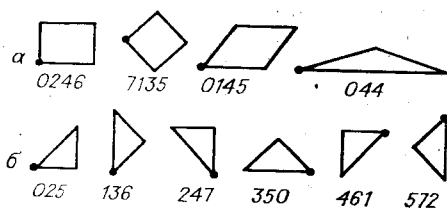


Рис. 3. Кодовые описания геометрических фигур (а) и изменение кодового описания фигуры в процессе ее вращения (б)

такие геометрические фигуры, как прямоугольники, трапеции, треугольники, ромбы, окружности и т. д.

На рис. 3, а представлены примеры кодовых описаний некоторых геометрических фигур. Кодовое описание окружностей с радиусами $R > 7$ содержит полный набор векторов 01234567. Увеличение радиуса приводит к дублированию некоторых цифр, а уменьшение — к перерождению окружности при $R \leq 4$ в квадрат. Оpozнание окружности в диапазоне $4 \leq R \leq 7$ может осуществляться лишь по количеству векторов, число которых в этом случае равно восьми.

Вследствие ограниченной разрешающей способности по углу кодовые описания некоторых геометрических фигур могут вырождаться, например, треугольник, приведенный на рис. 3, а, имеющий кодовое описание 044. Причина вырождения — несоответствие разрешающей способности системы измеряемому угловому параметру. Добавление или вычитание из каждого разряда кодового описания фигуры определенного числа будет способствовать вращению фигуры против либо по часовой стрелке на кратное прибавляемому или вычитаемому число углов. Так, для получения кодового описания фигуры, повернутой на 45° против часовой стрелки, достаточно к цифрам исходного описания прибавить 1 ($025 + 111 = 136$), для поворота на 90° — цифру 2 ($90 : 45$), ($025 + 222 = 247$) и т. д. Это обстоятельство может быть использовано для определения положения фигур на координатной плоскости. Пример вращения фигуры и изменения ее кодового описания приведен на рис. 3, б. Над фигурами и их логическими описаниями, как и над графами, можно выполнять определенные логические действия такие, как объединение, вычитание и пересечение, что позволяет осуществить логический анализ и синтез структуры графических изображений.

Используя полученные соотношения и аппарат формальных грамматик, можно выполнять логический анализ структуры изображений, цель которых — распознавание геометрических фигур деталей и их взаимного расположения на ленте конвейера или транспортной тележке автоматической транспортно-накопительной системы гибкого автоматизированного производства, распознавание вводимых или считываемых изображений в процессе графического диалога и ряд других применений.

Таким образом, если известны законы построения тех или иных фигур из данного алфавита, то, используя грамматику построения, можно выделить те или иные структуры.

Сформированные описанным образом векторы не включают параметра размерности и характеризуют только направление. В ряде случаев этого оказывается недостаточно, и наряду с направлением вектора необходимо знать и его величину. Это позволит, с одной стороны, выбраковывать векторы, длина которых незначительна, и, с другой — учитывать фактор размерности для более детальной классификации, например, выделения квадратов из прямоугольников, различения одинаковых фигур разного размера и т. д., поэтому представляется целесообразным рассмотреть вопрос о вычислении линейных размеров формируемых векторов.

Определение линейных размеров формируемых векторов. Исходными данными для решения этой задачи являются текущие значения элементарных приращений ΔX_i и ΔY_j и текущие значения проекций формируемого вектора X_i и Y_j . Используя эти переменные, можно записать

следующее выражение для вычисления функции рассогласования:

$$F_3 = \begin{cases} F_3 + (2X_i - 1), & \text{если } \Delta X_i = 1; \\ F_3 + (2Y_j - 1), & \text{если } \Delta Y_j = 1; \\ F_3 - (2Z_k - 1), & \text{если } \Delta Z_k = 1, \end{cases} \quad (8)$$

где текущее приращение ΔZ_k модуля вектора $Z_k = \sum_k \Delta Z_k$ определяется в соответствии с выражением

$$\Delta Z_k = \begin{cases} 1, & \text{если } F_3 \geq 0; \\ 0, & \text{если } F_3 < 0, \end{cases} \quad (9)$$

а начальное значение функции рассогласования принимается равным нулю.

Вычисления осуществляются в реальном времени следующим образом. По мере поступления текущих приращений ΔX_i и ΔY_j в соответствии с выражением (8) изменяется значение функций F_3 . Как только оно станет положительным, в соответствии с выражением (9) вырабатывается приращение ΔZ_k , затем вычисляется очередное значение модуля вектора $Z_k = Z_{k-1} + \Delta Z_k$ и значение функции F_3 . Значение Z_k с точностью до единицы соответствует значению модуля формируемого вектора.

Вычисление значения модуля позволяет определить реальные размеры геометрических фигур, в том числе и отслеживаемых кривых, что способствует более детальному анализу графических изображений.

Заключение. Предложен комплекс алгоритмов, позволяющих в процессе отслеживающего преобразования получать цифровые модели графических изображений, выделять производные элементы в виде векторов фиксированных направлений, составляющих основу логического описания структур графических изображений плоских объектов, попадающих в поле зрения анализирующей системы. Логический анализ получаемых в процессе отслеживания описаний позволяет выделять простейшие геометрические фигуры в процессе их считывания. Предложенные методы описания изображений могут быть использованы при построении распознающих систем, при разработке систем графического диалога, для сжатия и компактного представления исходной информации, для построения специализированных процессоров обработки изображений и в ряде других применений. Достоинство предложенных решений — простота их аппаратной реализации и выполнение вычислений в реальном времени. В связи с тем, что предложенный метод кусочно-линейной аппроксимации основан на использовании приемов, обратных интерполяционным, получаемая в процессе первичной обработки с использованием выражений (1) и (2) информация может быть использована для восстановления исходного изображения с помощью обратимых интерполирующих структур [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен.— М.: Мир, 1974.
2. Фу К. Структурные методы в распознавании образов.— М.: Мир, 1977.
3. Васильев В. И. Распознающие системы.— Киев: Наук. думка, 1983.
4. Завалишин Н. В., Мучник И. Б. Модели зрительного восприятия и алгоритмы анализа изображений.— М.: Наука, 1974.
5. Lee C. C., Hwang J. J., Hall E. L., Thomason M. G. New direction vector coding for shape description // Proc. 12 Annul. Southeast. Simp. Syst. Theory, Virginia Beach, Va, 1980.— N. Y., 1980.
6. Прэтт У. Цифровая обработка изображений.— М.: Мир, 1982.— Кн. 2.
7. Charles M. Williams. An efficient algorithm for the piecewise linear approximation of planar curves // Comp. Graphics and Image Proc.— 1978.— V. 8.
8. А. с. 734709 (СССР). Устройство для интерполяции и кусочно-линейной аппроксимации/Ю. И. Тормышев, М. П. Федоренко, В. С. Давейнис.— Опубл. в Б. И., 1980, № 18.

Поступила в редакцию 31 октября 1983 г.