УДК 681.3.06: 681.323 (519.6)

Л.Я. Ромм

МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ПЛОСКИХ КОНТУРНЫХ И ВНУТРИКОНТУРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СОРТИРОВКИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ И ПОДСТАНОВОК ИНДЕКСОВ

Рассмотрены схемы идентификации плоских контурных и внутриконтурных изображений по экстремальным признакам и закономерностям подстановок индексов на основе сортировки. Схемы инвариантны относительно сдвига, поворота и частичных искажений. Идентифицирующие векторы имеют целочисленные компоненты, упрощающие структуру базы эталонов и процесс идентификации.

Схемы; идентификации; инвариантны.

L.Ya. Romm

METHODS OF IDENTIFICATION OF FLAT OUTLINE AND INTRA-OUTLINE IMAGES USING SORTING OF EXTREME CHARACTERISTICS AND SUBSTITUTION OF INDEXES

Schemes of identification of flat outline and intra-outline images using sorting of extreme characteristics and regularity of substitution of indexes are considered. They are invariant with regard to displacement, ranging and particular distortions. Vectors of identification have integral components, which simplifies standards' base structure and the process of identification.

Schemes; identification; invariant.

К нерешенным в общем случае проблемам теории и практики классификации, распознавания и идентификации плоских растровых изображений относится их идентификация в случае искажений контура при произвольном сдвиге и повороте декартовых координат. При этом существенную трудность представляет построение устойчивых признаков изображения. Предлагается решение данных проблем для случая конечного множества фигур с ограниченным диапазоном искажений, который основан на определении глобальных и локальных экстремумов координат с помощью сортировки. Ниже на этой основе представлены два метода для обработки изображений: обработка по контуру (I) и обработка множества внутренних точек фигуры (II).

I. Сортировка применяется к массиву ординат или абсцисс точек контура фигуры, считанных в определенном порядке по горизонтали и вертикали. Для дальнейшей обработки используется определение серединной точки [1] фигуры, принимаемой за центр полярной системы координат. После ее определения исходные декартовы координаты точек изображения преобразуются в новые декартовы координаты, центр которых в серединной точке, а ось абсцисс проводится через данную точку и максимально удаленную от нее точку контура фигуры. Обработка выполняется в новых координатах, в которых с помощью сортировки идентифицируются все локальные и глобальные экстремумы координат точек контура.

Сортировка выбирается из класса устойчивых (сохраняющих порядок равных элементов) распараллеливаемых сортировок, устанавливающих взаимно однозначное соответствие между массивами входных и выходных индексов сортируемых элементов. Классы рассматриваемых сортировок описаны в [2, 3].

Помимо собственно сортировки, метод связан с основанным на ней алгоритмическим условием локализации экстремальных элементов числовой последовательности. Программная реализация этого условия [4, 5] раскрывает тот факт, что информация обо всех экстремальных элементах сортируемой последовательности, взаимосвязях и различиях их экстремальных особенностей полностью заключена в подстановке из входных и выходных индексов сортируемых элементов. Именно на такой подстановке основан принцип построения векторных идентификаторов плоского изображения.

Для идентификации контуров используется оператор локализации глобального минимума вида

```
{sort(n,a,c,e);} k:=1; WHILE k<= n DO BEGIN
FOR r:=1 TO k-1 DO
IF abs(e[k]-e[k-r]) > = 1 THEN GOTO 22; xk:=
 = x0+e[k]*h;                                        (1)
22: k := k+1 END;
```

Оператор вида

```
{sort(n,a,c,e);} k:=1; WHILE k<= n DO BEGIN
FOR r:=1 TO n–k DO
IF abs(e[k]–e[k+r]) > = 1 THEN GOTO 222;
xk:= x0+e0[k]*h;                                     (2)
222: k := k+1 END;
```

идентифицирует глобальный максимум той же последовательности.

Выполняется поворот фигуры в каноническое положение в новых декартовых координатах. После поворота путем описываемых ниже преобразований определяются все экстремальные признаки и идентификаторы контура фигуры, по которым этот контур идентифицируется. При этом идентификаторы будут иметь вид вектора с целочисленными компонентами [6], путем их сравнения с эталонными значениями выполняется полная идентификация контура фигуры, причем с единственностью в заданном множестве. Целочисленность координат векторов идентификации достигается за счет того, что каждый из элементов вектора идентификации отображает наличие или отсутствие определенных соотношений между экстремумами контура фигуры, при этом каждому такому соотношению по заданному правилу сопоставляется единственное целое число. Каждая из целочисленных координат вектора устойчива в собственном диапазоне целых значений, совокупность координат каждого вектора находится во взаимно однозначном соответствии с контуром фигуры из конечного множества. Как следствие, идентифицирующий вектор с единственностью определяет фигуру данного множества по ее контуру.

Конкретнее, достигнуть указанных качеств идентифицирующих векторов позволяют следующие преобразования контура изображения.

1. По пикселям производится четыре считывания исходных декартовых координат изображения. Первым выполняется считывание слева направо - сверху вниз, второе считывание – справа налево - снизу вверх, третье – справа налево - сверху вниз, четвертое – слева направо - снизу вверх. При этом считывание производится из некоторой начальной координаты точки экрана до первой встречи вдоль вертикали с точкой контура, после чего выполняется возврат в начальную точку с последующим сдвигом на один пиксель по горизонтали и, соответственно, возобновляется по вертикали. Процесс продолжается до некото-

рой фиксированной конечной точки экрана. Начальная и конечная точка выбираются так, чтобы заведомо охватить изображение.

2. Определяется серединная точка фигуры – точка с координатами (ниже в качестве обозначений употребляются программные идентификаторы координат и других числовых величин) $\left[SummAb, \mathrm{SummOrd} \right]$, где $SummAb$ – среднее арифметическое значение всех считанных абсцисс точек контура фигуры, а $SummOrd$ – среднее арифметическое значение всех считанных ординат в декартовой системе координат [7]:

$$SummAb = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1} x[i] \,,\ SummOrd = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1} y[i] \,. \tag{3}$$

Вычисления по данным формулам проводятся в отдельности для каждого из четырех считанных наборов координат контура изображения, затем в качестве координат серединной точки принимается среднее арифметическое полученных значений.

3. Для каждого из четырех соответственных считыванию наборов координат вычисляются длины отрезков, соединяющих точки контура с этими координатами и серединную точку (длины полярных радиусов точек контура). Вычисление выполняется по формуле

$$r = \sqrt{(x[i] - summx)^2 + (y[i] - summy)^2} \,, \tag{4}$$

где $summx$, $summy$ – координаты серединной точки, вычисляемой на основе (3), $x[i]$ и $y[i]$ – текущие координаты точек контура.

4. С учетом каждого из четырех наборов полученных полярных радиусов при помощи сортировки подсчетом находится максимальный из четырех наибольших радиусов, его индекс и определяются его декартовы координаты. Помимо того, определяются наибольшие и наименьшие значения длин радиусов (4) в каждом наборе, а также их декартовы координаты и порядковые номера. Декартовы координаты конца максимального из четырех наибольших радиусов ниже обозначаются программными идентификаторами $b[\mathrm{maxn}[4]]$ и $bb[\mathrm{maxn}[4]]$.

5. Через серединную точку с координатами $summx$, $summy$ и конец наибольшего радиуса с координатами $b[\mathrm{maxn}[4]]$ и $bb[\mathrm{maxn}[4]]$ проводится ось абсцисс новой декартовой системы координат. С этой целью предварительно вычисляется угол между старой и новой осью абсцисс по соотношениям:

$$\left.\begin{array}{l} tga1 = (\mathrm{b[maxn[4]]} - \mathrm{summy})/(\mathrm{bb[maxn[4]]} - \mathrm{summx}); \\ \mathrm{alpha1} = \mathrm{arctg}(tga1) \end{array}\right\} \tag{5}$$

В итоге, новые декартовы координаты с поворотом относительно старых на угол (5) с началом координат в точке ($summx$, $summy$) создают привязку декартовых координат к произвольно расположенной на плоскости фигуре. Дальнейшая обработка, инвариантно относительного вида изображения рассматриваемого класса, выполняется в новой системе координат

$$\begin{array}{l} x' = (x - summAb) * \cos(alpha1) + (y - summOrd) * \sin(alpha1) \,, \\ y' = -(x - summAb) * \sin(alpha1) + (y - summOrd) * \cos(alpha1) \,, \end{array} \tag{6}$$

где $alpha1$ из (5).

6. Элементы массивов предварительно считанных координат преобразуются в новую систему координат (6):

$$\left.\begin{aligned} xnew[i] &= (x[i]-summx)*\cos(alpha1)+(y[i]-summy)*\sin(alpha1)\ , \\ ynew[i] &= -(x[i]-summx)*\sin(alpha1)+(y[i]-summy)*\cos(alpha1)\ . \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

7. Массивы новых ординат из (7) сортируются с помощью процедуры $sort$, после чего с помощью процедур $local\max$ и $local\min$, работающих на основе операторов локализации (1), (2), определяются их глобальные экстремумы.

8. Числовые значения глобальных экстремумов и их индексов подвергаются простейшим арифметическим преобразованиям: из них составляются абсолютные величины разностей индексов и разностей значений, например,

```
dlina1 := abs(indexMax1[f] - indexMax2[fff]);
dlina2 := abs(indexMax2[fff] - indexMin2[ffff]);
dlina3 := abs(ordinataMax1[f] - ordinataMin2[ffff]);
.............................................................................
dlina10 := (IndexMax3[f1] - IndexMax2[ff1]);
```

Здесь ordinataMax1[f], ordinataMax2[fff] – идентификаторы глобальных максимумов, полученных при первом и втором считываниях соответственно, indexMax1[f], indexMax2[fff] – идентификаторы их индексов, другие идентификаторы имеют аналогичный смысл.

9. Из полученных разностей составляются дроби, умноженные на число десять с округлением до целого.

```
otnosh[1] := trunc(10 * (dlina1 + 1)/(dlina2 + 1));
otnosh[2] := trunc(10 * (dlina2 + 1)/(dlina3 + 1));
otnosh[3] := trunc(10 * (dlina1 + 1)/(dlina3 + 1));
.............................................................................
otnosh[9] := trunc(10 * (dlina9 + 1)/(dlina10 + 1));
```

Сдвиг числителя и знаменателя на единицу выполнен, чтобы избежать в дальнейшем деления на ноль. Совокупность этих дробей образует вспомогательный вектор otnosh[1], otnosh[2], ..., otnosh[9].

10. Путем преобразований вспомогательного вектора с использованием выражений строится выходной вектор otnosh1[1] , otnosh1[2] ..., otnosh1[9] . Построение таково, что этот вектор с единственностью соответствует каждой фигуре произвольно заданного конечного множества при рассмотренных в начале ограничениях. Полный набор таких векторов и реализующая метод программа представлены в [8]. Ниже приводится фрагмент условий, по которым формируются координаты вектора для приведенного в [8] множества из 16 фигур с дополнительным включением искажений сравнительно произвольного вида:

```
if (otnosh[1] = 10) or (otnosh[1] = 9) then otnosh1[1]:= 1;
if otnosh[1] = 0 then otnosh1[1]:= 2;
if (otnosh[2] = otnosh[3]) or (abs(otnosh[2] - otnosh[3]) = 2) then otnosh1[2]:= 1;
if (otnosh[2] < 20) and (otnosh[2] > 9) then otnosh1[2]:= 2;
if (otnosh[2] < 300) and (otnosh[2] > 170) then otnosh1[2]:= 3;
.......................................................................................................................
if (otnosh[8] > 20) and (otnosh[8] < 100) then otnosh1[8]:= 1;
if (otnosh[8] >= 10) and (otnosh[8] <= 20) then otnosh1[8]:= 2;
if (otnosh[8] > 80) and (otnosh[8] < 700) then otnosh1[8]:= 3;
if otnosh[9] = 1 then otnosh1[9]:= 1;
if otnosh[9] = 9 then otnosh1[9]:= 2;
if otnosh[8] = otnosh[9] then otnosh1[9]:= 3;
```

Как отмечалось, каждый из элементов идентифицирующего вектора отображает наличие или отсутствие определенных соотношений между экстремумами (в данной части описания – глобальными) контура фигуры, при этом каждому такому соотношению по заданному правилу, пример которого дан непосредственно выше, сопоставляется единственное целое число.

II. Излагаемая схема переносится с внешнего контура плоской фигуры на заключенное в ней множество внутренних точек. Предполагается, что для его идентификации наиболее пригодно сквозное сечение фигуры с формированием признаков на основе подстановок и их преобразований, которое проводится после выполнения описанной обработки и идентификации внешнего контура. Он заключается в следующем.

Пусть выполнена описанная выше обработка контура с поворотом фигуры в каноническое положение в новых декартовых координатах. Всюду ниже фигура считается расположенной канонически, обозначения новых декартовых координат специально не вводятся и используются обозначения *XOY*. Иными словами, априори считается, что фигура уже имеет каноническое положение в декартовых координатах, при этом центр координат находится в точке (3).

Как синонимы направлений считывания вдоль осей координат употребляются термины считывания по вертикали и считывания по горизонтали.

Далее, в качестве абсциссы начальной точки для считывания выбирается наименьшая абсцисса точек контура фигуры. В качестве ординаты той же точки – длина наибольшего из полярных радиусов фигуры (отрезков, проведенных из серединной точки до встречи с контуром).

В качестве абсциссы конечной точки считывания выбирается наибольшая абсцисса контура, в качестве ординаты конечной точки – число, равное наибольшему радиусу, взятому с минусом. Как отмечалось, вертикаль, по которой производится считывание, ортогональна оси *OX* (в новых координатах), сдвиг вертикали при выполнении обхода происходит по оси *OX* на параметрически задаваемое число пикселей. Ниже приводятся предварительные примеры подстановок, образуемых сквозным считыванием точек изображений элементарных фигур. Фигуры задаются абстрактно в каноническом положении в декартовых координатах с направлением осей *OX* вправо, *OY* - вверх. Сквозное сечение задается равноотстоящими вертикалями, расстояние между которыми принимается за шаг H = const. При этом по вертикали считываются все подряд точки, по горизонтали $H = \frac{1}{16} D$, где D – горизонтальный диаметр фигуры, шестнадцатая часть которого – параметрическое значение шага по горизонтали. Исходные номера считываемых точек задаются в направлении сверху вниз по каждой вертикали и слева направо при переходе от одной вертикали к другой.

Для идентификации изображений, конвертированных рассматриваемым способом в одномерный числовой массив, целесообразно использовать подстановку, составленную индексами элементов на входе сортировки и их перестановкой на выходе,

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & \dots & N \\ i_1 & i_2 & i_3 & \dots & i_N \end{pmatrix}. \tag{8}$$

Для различных по форме признаков потребуются преобразования подстановки (7). Первое из них

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & N-1 & N \\ \Delta_1 & \Delta_2 & \dots & \Delta_{N-1} & \Delta_N \end{pmatrix}, \tag{9}$$

где для i_j из (8):

$$\Delta_j = j - i_j, \qquad j = 1, 2, \dots, N. \tag{10}$$

Во втором – нижний ряд (9) заменяется набором разностей собственно элементов этого ряда:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & \dots & N-2 & N-1 & N \\ \Delta_1^{(1)} & \Delta_2^{(1)} & \Delta_3^{(1)} & \dots & \Delta_{N-2}^{(1)} & \Delta_{N-1}^{(1)} & \end{pmatrix}, \tag{11}$$

где для Δ_j из (10):

$$\Delta_j^{(1)} = \Delta_j - \Delta_{j+1}, \qquad j = 1, 2, \dots, N-1. \tag{12}$$

В третьем – производится замена нижнего ряда (9) на ряд разностей элементов непосредственно самого нижнего ряда из (8):

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & \dots & N-2 & N-1 & N \\ \nabla_1 & \nabla_2 & \nabla_3 & \dots & \nabla_{N-2} & \nabla_{N-1} & \end{pmatrix}, \tag{13}$$

где для i_j из (8):

$$\nabla_j = i_{j-1} - i_j, \qquad j = 2, \dots, N. \tag{14}$$

Использование (8) – (14) целесообразно, когда (8) взаимно однозначно соответствует оцифрованным изображениям из конечного множества. В общем случае соответствие однозначно и сужает множество идентифицируемых объектов. Установить взаимную однозначность соответствия всегда возможно при надлежащих дополнительных ограничениях. После сортировки массива ординат (затем абсцисс) внутренних точек распознавание сводится к обработке индексов из (8) – (14). В частности, целесообразно в качестве признаков рассматривать локализованные с помощью измененных операторов локализации (1), (2) экстремумы среди элементов нижнего ряда этих преобразований подстановок. Если в (1), (2) знак неравенства заменить на противоположный и учесть радиус окрестности локализации экстремума $eps0$ ($>= 1$ заменить на $<= eps0$), то эти операторы определяют, соответственно, локальный минимум и локальный максимум [5, 6]. На практике для идентификации изображений было выбрано $eps0 = 2$.

Конкретно для раскрытия экстремальных особенностей множества внутренних точек фигуры производятся следующие действия. Вначале производится сортировка считанных ординат. Затем вычисляются разности между индексами отсортированных ординат и порядковым номером этих индексов. Данные разности передают характер изображения, находящегося во множестве внутренних точек фигуры. Отличительным признаком являются ряды одинаковых чисел, а также местоположение таких рядов – в начале, середине или конце массива. Следующее преобразование состоит в нахождении локальных максимумов и локальных минимумов среди индексов отсортированных координат изображения с помощью модифицированных операторов локализации (1), (2). Идентифицированные локальные экстремумы в совокупности с их индексами образуют новые закономерности, характерные для определенных классов изображений.

Для выявления уникальных особенностей различных видов фигур дополнительно используются последовательные разности между последующим и текущим локальным экстремумом индексов координат. Значения этих разностей оказываются строго фиксированными для определенных типов изображений.

После этого находятся локальные минимумы и максимумы среди считанных ординат изображения. Количество данных локальных экстремумов может варьироваться в зависимости от параметров фигуры, однако определенные экстремумы сохраняют неизменное значение независимо от размера и положения фигуры.

Целесообразно отметить, что изложенная целочисленная идентификация отличается от известных схем [9, 10], а также [11] по построению, по использованию экстремальных признаков, по качеству идентификации искаженных изображений. От подхода, изложенного в [1], основное отличие заключается в целочисленности компонент идентифицирующих векторов, упрощающих структуру баз эталонных векторов и делающих точной операцию сравнения с эталоном.

Метод переносится с плоских изображений на идентификацию образов, в общем случае представимых на входе метода числовой последовательностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Рюмин О.Г.* Разработка и исследование алгоритмов распознавания изображений на основе определения экстремальных признаков замкнутых контуров с помощью сортировки. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Таганрог: Изд-во ТТИЮФУ, 2008. – 16 с.

2. *Ромм Я.Е.* Параллельная сортировка слиянием по матрицам сравнений. I // Кибернетика и системный анализ. – 1994. – № 5. – С. 3 – 23.

3. *Ромм Я.Е.* Параллельная сортировка слиянием по матрицам сравнений. II // Кибернетика и системный анализ. – 1995. – № 4. – С. 13 – 37.
4. *Ромм Я.Е.* Локализация и устойчивое вычисление нулей многочлена на основе сортировки. I // Кибернетика и системный анализ. – 2007. – № 1. – С. 165 – 182.
5. *Ромм Я.Е.* Локализация и устойчивое вычисление нулей многочлена на основе сортировки. II // Кибернетика и системный анализ. – 2007. – № 1. – С. 161 – 174.
6. *Ромм Л.Я., Ромм Я.Е.* Целочисленная идентификация плоских контурных изображений на основе экстремальных признаков // Известия вузов. Технические науки», раздел «Управление, вычислительная техника и информатика». – 2008. – №4. – С. 18 – 24.
7. *Ромм Я.Е., Рюмин О.Г.* Автоматическая идентификация плоских изображений по экстремальным признакам на основе сортировки // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. Прил. к № 1. – 2006. – С. 37 – 47.
8. *Ромм Л.Я., Ромм Я.Е.* Целочисленная идентификация плоских контурных изображений с учетом поворота, масштаба и искажений на основе экстремальных признаков / ТГПИ. – Таганрог, 2008. – 58 с. ДЕП в ВИНИТИ 28.01.2008, № 54 – В2008.
9. *Местецкий Л.М.* Скелетизация многоугольной фигуры на основе обобщенной триангуляции Делоне // Программирование. – 1999. – № 3. – С. 16 – 31.
10. Никулин Е.А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 560 с.
11. *Тюшнякова И. А.* Разработка и исследование схем применения сортировки для поиска нулей и особенностей функций с приложением к идентификации плоских изображений. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – 16 с.

Ромм Леонард Яковлевич
Таганрогский государственный педагогический институт
E-mail: romm@list.ru
347936, г. Таганрог, ул. Инициативная, д. 48. Тел.: 88634 60-18-99

Romm Leonard Yakovlevich
Taganrog State Pedagogical Institute
E-mail: romm@list.ru
48, Initsiativnaia, Taganrog, 347936. Phone: 88634 60-18-99

УДК 519.6: 681.3

Л.Н. Аксайская

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ КУСОЧНО-ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ФУНКЦИЙ, ПРОИЗВОДНЫХ И ИНТЕГРАЛОВ

Рассмотрены схемы таблично-алгоритмического вычисления функций на основе кусочно-полиномиальной аппроксимации с помощью интерполяционного полинома Ньютона. Описана модификация схем для вычисления производных и определенных интегралов с сохранением свойств инвариантности относи-