

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ РУКОПИСНЫХ И МАШИНОПИСНЫХ ЦИФР

А.С. Нудельман

Общеизвестно, что читающий автомат реализует некоторое преобразование вида (изображение K на листе $\rightarrow$ результат RES чтения). Чаще всего это преобразование имеет вид $\langle K \rightarrow \text{рецепторное представление } R_0 \text{ изображения} \rightarrow RES \rangle$. Операция $\langle K \rightarrow R_0 \rangle$ осуществляется оптическим считывающим устройством (такие устройства уже разработаны, построены и эксплуатируются). Если иметь в виду автомат, предназначенный для чтения рукописных цифр без каких-либо искусственных ограничений на почерк, то для такого читающего автомата практически приемлемая процедура $\langle R_0 \rightarrow RES \rangle$ еще не известна, т.е. не найден подходящий алгоритм распознавания.

В данной работе описан алгоритм распознавания цифр, который может быть положен в основу построения автомата, читающего как выполненные любым разборчивым почерком рукописные, так и любым шрифтом машинописные цифры. Этот алгоритм реализует преобразование $\langle R_0 \rightarrow \text{первичное кусочно-линейное представление } TC_0 \text{ изображения} \rightarrow RES \rangle$. Часть алгоритма, соответствующая операции $\langle R_0 \rightarrow TC_0 \rangle$, основана на идее фрагментного анализа изображений [1,3]; часть алгоритма, соответствующая операции $\langle TC_0 \rightarrow RES \rangle$, построена на базе квазипсихологического подхода к проблеме распознавания изображений [2].

Описанный ниже алгоритм построен на основе обучающей выборки из 500 изображений цифр. Такой обучающей выборки оказалось достаточно для учета (в алгоритме) практически всех "массовых" почерков. Дальнейшее уточнение алгоритма, осуществленное при его экспериментальном исследовании (§5), не изменило общей идеи описанного алгоритма, а коснулось лишь системы описаний цифр (конфигураций). Все константы (пороги) в алгоритме подобраны экспериментально.

§1. Общая схема алгоритма

Введем необходимые определения и обозначения.

Рецепторное поле P есть ограниченное прямоугольником множество элементов дискретной плоскости, имеющей элементы-квадраты. Столбцы рецепторного поля нумеруются слева направо от 1 до X , строки - снизу вверх от 1 до Y . Элемент a , лежащий на пересечении i -го столбца и j -й строки, обозначается через a_{ij} , где i есть x -координата элемента, a_j - y -координата. Элемент a_{ij} называется внутренним, если $1 < i < X$ и $1 < j < Y$.

Рецепторное представление R изображения (на P) есть подмножество множества всех внутренних элементов рецепторного поля P . Обычно $a_{ij} \in R$ [$\notin R$] означает, что соответствующее место на изображении, сканируемом оптическим считывающим устройством, зачернено [не зачернено].

Все вводимые ниже понятия определяются для фиксированных (хотя и произвольных) P и R .

Высота N рецепторного представления R есть величина $m-n+1$, где m и n таковы, что

$$\forall i, j (a_{ij} \in R \rightarrow n \leq j \leq m) \ \& \ \exists i, j (a_{in} \in R \ \& \ a_{jm} \in R).$$

Сегмент $S(i, j, k)$ (или просто S) есть последовательность $\langle a_{ij}, a_{ij+1}, \dots, a_{ik} \rangle$ элементов из R такая, что $a_{ij-1} \notin R$ и $a_{ik+1} \notin R$. Здесь величина $k-j+1$ есть высота $h(S)$ сегмента S , элемент a_{ik} - верхний, a_{ij} - нижний, а элемент a_{il} при $l=(j+k)/2$ - средний элемент сегмента S . (Здесь и далее имеется в виду только целочисленное деление.)

Сегмент $S_1(i, j, k)$ сцеплен справа [слева] с сегментом $S_2(l, m, n)$, если $l=i+1$ [$l=i-1$] и $j \leq n+1$ & $k \geq m-1$. Сегмент S называется внутренним (в R), если S сцеплен справа точно с одним сегментом, который сцеплен слева только с S , и S сцеплен слева точно с одним сегментом, который сцеплен справа только с S .

Все сегменты рецепторного представления упорядочены отношением предшествования: $S_1(i, j, k) < S_2(l, m, n) \leftrightarrow i < l \vee i = l \ \& \ j < m$.

Фрагмент F есть последовательность $\langle S_1, S_2, \dots, S_n \rangle$ сегментов такая, что

- каждый сегмент S_i , $1 < i < n$, сцеплен справа с S_{i+1} ,
- каждый сегмент S_i , $1 < i < n$, является внутренним,

в) каждый сегмент $S_i, i > 1$, таков, что:

- если $h(S_1) < H/4$, то $(h(S_1) < H/4 \text{ или } h(S_1) < 2h_1)$,
- если $h(S_1) > H/2$, то $(h(S_1) > H/2 \text{ или } h(S_1) > h_1/2)$,
- если $H/4 \leq h(S_1) \leq H/2$, то $h_1/2 < h(S_1) < 2h_1$, где

$$h_1 = \frac{1}{i-1} \sum_{m=1}^{i-1} h(S_m).$$

Здесь S_1 - левый, S_n - правый, а S_k при $k = (n+1)/2$ - средний сегмент фрагмента.

Фрагмент $F = \langle S_1, S_2, \dots, S_n \rangle$ максимален, если для любого сегмента S последовательность $\langle S_1, S_2, \dots, S_n, S \rangle$ не будет фрагментом. Фрагмент F_1 сцеплен справа [слева] с фрагментом F_2 , если правый [левый] сегмент F_1 сцеплен с левым [правым] сегментом F_2 .

Элемент a принадлежит фрагменту F , если a принадлежит некоторому сегменту из F . Верхний [нижний] элемент F есть элемент a_{mn} , принадлежащий F и такой, что для любого элемента a_{ij} , принадлежащего F , либо $n > j$ [$n < j$], либо $n = j$ и $m \leq i$.

Фрагментное представление FR изображения есть последовательность $\langle F_1, F_2, \dots, F_n \rangle$ максимальных фрагментов (представления R) такая, что

а) левый сегмент фрагмента $F_i, 1 \leq i < n$, предшествует левому сегменту фрагмента F_j , если $i < j$;

б) левый сегмент любого фрагмента из FR либо не внутренний, либо сцеплен слева с правым сегментом некоторого фрагмента из FR .

Отметим, что любое изображение имеет точно одно свое фрагментное представление.

Точка t соответствует элементу a_{ij} (поля P), если $x(t) = i$ и $y(t) = j$.

Первичное кусочно-линейное представление TC_0 изображения есть пара $\langle T, C_0 \rangle$ множеств, порождаемая из фрагментного представления FR алгоритмом, описанным в §3, где T - множество попарно различных точек, соответствующих некоторым элементам поля P , а C_0 - множество первичных связей (отрезков), состоящее из пар $\langle t_i, t_j \rangle$ различных точек из T , причем если $\langle t_i, t_j \rangle \in C_0$, то и $\langle t_j, t_i \rangle \in C_0$.

Отметим, что для реального линейчатого изображения его первичное кусочно-линейное представление является идеализированным представлением, поскольку в нем полностью исключены толщины реальных линий, и конструктивным представлением, поскольку сами линии заменены их кусочно-линейной аппроксимацией ввиду того, что связь

$\langle t_i, t_j \rangle$ из C_0 интерпретируется как прямолинейный отрезок с концами в точках t_i и t_j .

Достроенная связь (отрезок) есть пара $\langle t_1, t_2 \rangle$ точек из T такая, что

а) для любых t', t'' из T , если $(t' = t_1$ или $\langle t', t_1 \rangle \in C_0)$ и $(t'' = t_2$ или $\langle t'', t_2 \rangle \in C_0)$, то $r(t_1, t_2) \leq r(t', t'')$;

б) для любой точки t из T $r^2(t_1, t_2) \leq r^2(t_1, t) + r^2(t_2, t)$, где через $r(t_i, t_j)$ обозначено расстояние между точками t_i и t_j .

Кусочно-линейное представление ТС изображения есть пара $\langle T, C \rangle$ множеств таких, что множество T совпадает с множеством T первичного представления TC_0 , а множество C связей есть множество C_0 первичных связей, пополненное достроенными связями (для C тоже выполняется свойство: если $\langle t_i, t_j \rangle \in C$, то и $\langle t_j, t_i \rangle \in C$).

Отметим, что достроенная связь из C интерпретируется как прямолинейный отрезок, соединяющий соответствующие точки и восполняющий возможный разрыв реальной линии изображения.

Линия L есть последовательность $\langle t_1, t_2, \dots, t_n \rangle$, $n > 1$, точек из T такая, что а) $\forall i < n (\langle t_i, t_{i+1} \rangle \in C)$, б) $\forall i < n, j < n (i \neq j \rightarrow t_i \neq t_j)$ и в) $\forall i < n (t_n \neq t_i)$ или $\exists i < n-2 (t_n = t_i)$. Здесь t_1 — начальная точка линии L , а t_n — конечная точка. Если $i < n-2$ & $t_n = t_i$, то подпоследовательность $\langle t_i, t_{i+1}, \dots, t_n \rangle$ будет называться окружностью O в линии L .

Связь $\langle t', t'' \rangle$ используется в линии L [окружности O], если существует такое i , что $t_i, t_{i+1} \in L$ [0] и либо $t' = t_i$ & $t'' = t_{i+1}$, либо $t' = t_{i+1}$ & $t'' = t_i$. Линии L_1 и L_2 раздельны, если каждая связь из C , используемая в одной линии, не используется в другой.

Конфигурация есть конечное множество попарно раздельных нумерованных линий, обладающих определенными геометрическими свойствами. Все конфигурации, заложенные в алгоритм, изображены на рис.1 (линии конфигураций на рисунке выполнены в естественной форме (а не в кусочно-линейной), геометрические свойства линий отражены схематично). Полное описание конфигураций дано в §4.

Блок-схема алгоритма распознавания представлена на рис.2. На вход алгоритма подается исходное рецепторное представление R_0 изображения, получаемое оптическим считывающим устройством.

Блок предварительной обработки устраняет вносимые оптическим считывающим устройством помехи в виде незначительных по размерам деталей представления R_0 , искажающих топологию реального изображения.

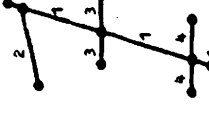
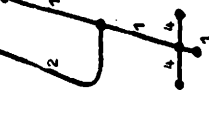
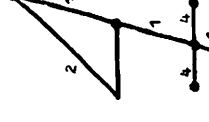
I тип	 I.1.1	 I.1.2	 I.1.3	 I.2.4	 I.2.5
II тип	 II.2.1	 II.2.2	 II.2.3	 II.2.4	 II.2.5
III тип	 III.3.1	 III.3.2	 III.3.3	 III.3.4	 III.3.5

Рис. 1. Типы конфигураций.

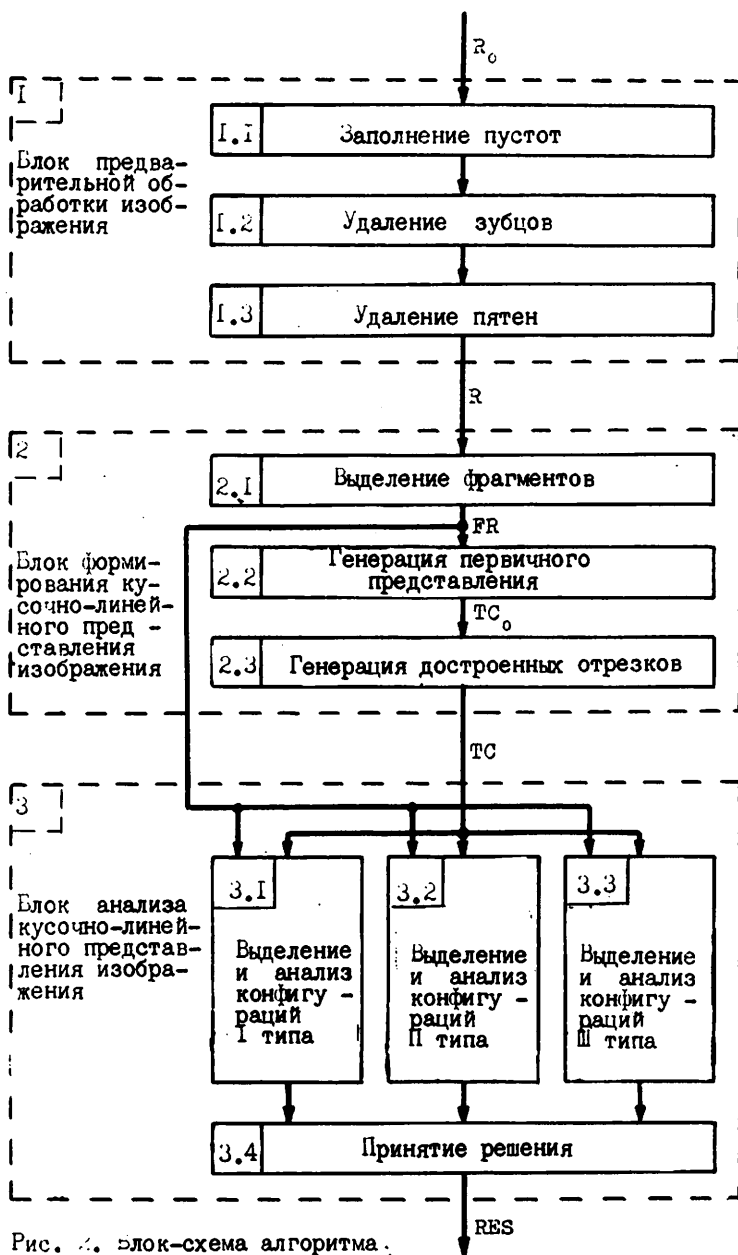


Рис. 2. Блок-схема алгоритма.

Для отфильтрованного представления R строится его фрагментное представление FR , по которому формируется первичное кусочно-линейное представление TC_0 . Пополнение множества C_0 первичных связей достроенными отрезками завершает формирование кусочно-линейного представления TC изображения.

Последний блок алгоритма использует кусочно-линейное представление TC для его анализа и принятия решения. Анализ представления TC заключается в поиске (в TC) линий конфигураций и исследовании их геометрических свойств. Результатом анализа является фиксация всех экземпляров (конкретных реализаций) всех конфигураций, которые существуют в TC . Как правило, кусочно-линейное представление содержит в себе несколько экземпляров конфигураций.

Каждая конфигурация определяет цифру, причем цифра 0 определяется конфигурацией $K1.1$, цифра 1 - конфигурацией $K3.1$, цифра 2 - конфигурациями $K2.1$ и $K2.3$, цифра 3 - $K2.4$, цифра 4 - $K3.3$ и $K3.4$, цифра 5 - $K2.5$, цифра 6 - $K1.1$, цифра 7 - $K3.1$ и $K3.2$, цифра 8 - $K1.2$ и $K1.3$ и цифра 9 - конфигурацией $K2.2$. Поскольку конфигурации $K1.1$ и $K3.1$ не определяют цифру однозначно, то выбор одной из цифр осуществляется в каждом конкретном случае (экземпляре) в результате анализа геометрических свойств выделенного экземпляра конфигурации. Использование для идентификации конфигураций свойств фрагментного представления FR обусловлено тем, что некоторые экземпляры конфигураций $K2.1$ и $K3.1$ неотличимы друг от друга по геометрическим свойствам (в конфигурации $K3.1$ левая часть линии 4, средняя часть линии 1 и линия 2 могут образовать линию 1 конфигурации $K2.1$, а правая часть линии 4 в $K3.1$ может образовать линию 3 в $K2.1$).

Блок принятия решения выбирает превалирующий (см. ниже) экземпляр конфигурации (из найденных) и определяет решение RES алгоритма распознавания. Решение имеет одно из одиннадцати значений: десять цифр и $\emptyset$ (отказ).

Рассмотрим работу алгоритма распознавания на примере изображения, представленного на рис. 3. На этом рисунке исходное рецепторное представление R_0 изображения заштриховано вертикальной чертой.

Блок предварительной обработки добавляет к рецепторному представлению R_0 элементы пустоты ($a_{18,21}$ и $a_{18,22}$), удаляет из R_0 элементы зубцов ($a_{10,28}$, $a_{10,29}$, $a_{10,32}$ и др.), удаляет из R_0 элементы пятен ($a_{4,19}$, $a_{23,5}$ и др.).

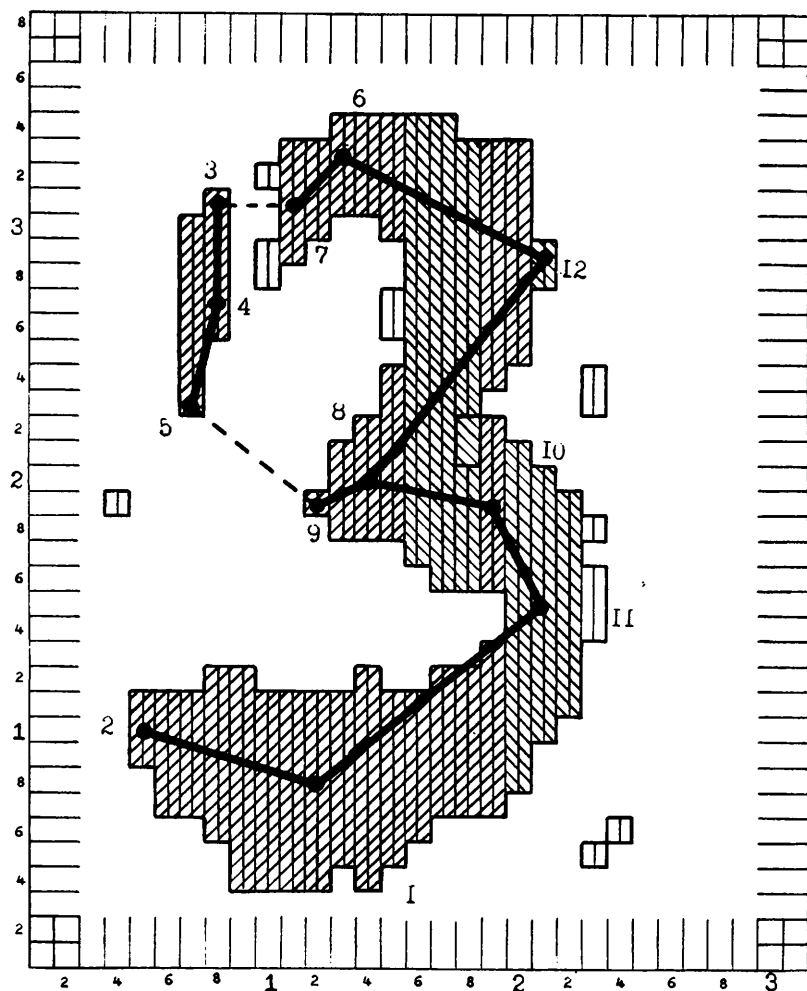


Рис.3. Изображение и его обработка

Отфильтрованное рецепторное представление R (заштриховано наклонной чертой) разбивается на 9 фрагментов (составляющих представление FR), которые обозначены штриховкой разного наклона. Далее формируются множество T , состоящее из одиннадцати точек (все точки пронумерованы в порядке их порождения и расположены в местах, соответствующих их координатам), и множество C (первичная связь обозначена отрезком прямой линии). Затем генерируются два достроенных отрезка (обозначены пунктирной линией).

Блок анализа TC находит два экземпляра конфигурации $\{2,4: \langle \langle 2, I, II, IO, 8, 9 \rangle, \langle 8, I2, 6, 7, 3, 4, 5 \rangle \rangle$ и $\langle \langle 2, I, II, IO, 8, 9 \rangle, \langle 8, I2, 6, 7 \rangle \rangle$. Принимается решение - цифра 3.

§2. Блок предварительной обработки

Введем следующие определения. Пустота есть последовательность $\langle a_{ij}, a_{ij+1}, \dots, a_{ik} \rangle$, $1 < i < X$ и $1 < j \leq k < Y$, элементов рецепторного поля, не принадлежащих представлению R , такая, что

- а) $a_{ij-1} \in R$ и $a_{ik+1} \in R$,
- б) для всякого $j \leq 1 \leq k$ $a_{i-1,1} \in R$ и $a_{i+1,1} \in R$,
- в) из элементов $a_{i-1,j-1}, a_{i-1,k+1}, a_{i+1,j-1}$ и $a_{i+1,k+1}$ хотя бы один не принадлежит R .

Зубец справа [слева] сегмента S есть сегмент S' такой, что

- а) S сцеплен справа [слева] с S' ,
- б) S' сцеплен слева [справа] только с S ,
- в) S' не сцеплен справа [слева] ни с одним сегментом.

Черное пятно есть фрагмент, не сцепленный ни с одним другим фрагментом, если число элементов, принадлежащих этому фрагменту, не превышает 4% от общего числа элементов в рецепторном представлении.

Белое пятно есть последовательность $\langle a_{ij}, a_{ij+1}, \dots, a_{ik} \rangle$, $1 < i < X$ и $1 < j \leq k < Y$, элементов рецепторного поля, не принадлежащих представлению R , такая, что

- а) $a_{ij-1} \in R$ и $a_{ik+1} \in R$,
- б) для всякого $j-1 \leq 1 \leq k+1$ $a_{i-1,1} \in R$ и $a_{i+1,1} \in R$. Величина $k-j+1$ называется высотой белого пятна.

Блок заполнения пустот расширяет исходное рецепторное представление изображения за счет элементов пустот. Поиск пустот осуществляется в направлении слева направо, а в столбце - снизу вверх.

Блок удаления зубцов поочередно, в соответствии с отношением предшествования, просматривает все сегменты. Пусть S - очередной сегмент. В этом случае удаляются элементы зубцов слева сегмента S , если число сегментов, с которыми S сцеплен слева, больше 1. Аналогичная процедура выполняется для зубцов справа при обходе сегментов в обратном порядке.

Блок удаления пятен удаляет из рецепторного представления все элементы черных пятен и добавляет в рецепторное представление все элементы белых пятен, высота которых не более 2.

§3. Блок формирования кусочно-линейного представления

Для любого фрагмента $F_k = \langle S_1, S_2, \dots, S_n \rangle$ из представления FR введем следующие обозначения: $F_k^1, F_k^2, F_k^3[F_k^9, F_k^{10}, F_k^{11}]$ - это x -координата, минимальная y -координата, максимальная y -координата элементов сегмента $S_1[S_n]$ соответственно; $F_k^{17}[F_k^{18}]$ - это y -координата нижнего [верхнего] элемента среднего сегмента фрагмента F_k ; $F_k^{19}[F_k^{20}], F_k^{21}[F_k^{22}]$ - это x -координата [y -координата] верхнего, x -координата [y -координата] нижнего элемента фрагмента F_k соответственно; $F_k^4[F_k^{12}]$ - число фрагментов из FR , с которыми F_k сцеплен слева [справа]; $F_k^5, F_k^6, F_k^7[F_k^{13}, F_k^{14}, F_k^{15}]$ - фрагменты из FR , записанные в порядке их вхождения в FR , с которыми F_k сцеплен слева [справа], причем если фрагмент F_k^i , $i = 5, 6, 7$ [$i = 13, 14, 15$] не существует, то $F_k^i = \emptyset$; F_k^{24} - (геометрический) признак фрагмента, причем $F_k^{24} = -1$, если $h(S_1) < H/4$, $F_k^{24} = 1$, если $h(S_1) > H/2$ и $F_k^{24} = 0$, если $H/4 \leq h(S_1) \leq H/2$; F_k^{30} - номер схемы расстановки (на поле P) точек из T и связей из C_0 , порожденных фрагментом F_k ; $F_k^{30} \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$; F_k^{25} - множество точек, наведенных на фрагмент F_k (понятие "наведенная точка" раскрывается в алгоритме A_2).

Величина $Y_1[Y_2]$ есть $\min\{F_k^{22}\}[\max\{F_k^{20}\}]$, $F_k \in FR$.

Для рассматриваемого фрагмента F введем следующие обозначения: N - число точек в F^{25} ; если $0 < F^4 < 4$, то N_1 - фрагмент F^5 , а N_2 - фрагмент F^{4+i} , где $i = F^4$; если $0 < F^{12} < 4$, то N_3 - фрагмент F^{13} , а N_4 - фрагмент F^{12+i} , где $i = F^{12}$; $L[R]$ - число строк, содержащих как элемент фрагмента F , так и элемент правого [левого] сегмента фрагмента из FR , с которым F сцеплен слева [справа]; l_0 есть $F^9 - F^1 + 1$; b_0 есть $F^{20} - F^{22} + 1$; h_1 есть

$F^{18} = F^{17} + 1$; y_0 есть $(F^{20} + F^{22})/2$; y_1 есть $F^{22} + h_0/4$; y_2 есть $F^{20} - h_0/4$; точки $\tau_1 - \tau_6$ таковы, что: $x(\tau_1) = F^1$, $y(\tau_1) = (F^1 + F^3)/2$, $x(\tau_2) = F^9$, $y(\tau_2) = (F^{10} + F^{11})/2$, $x(\tau_3) = F^{21}$, $y(\tau_3) = F^{22}$, $x(\tau_4) = F^{19}$, $y(\tau_4) = F^{20}$, $x(\tau_5) = (F^1 + F^9)/2$, $y(\tau_5) = (F^{17} + F^{18})/2$, $x(\tau_6) = (F^{19} + F^{21})/2$, $y(\tau_6) = (F^{20} + F^{22})/2$.

Каждая точка t , наведенная на некоторый фрагмент, имеет два параметра $P(t)$ и $Q(t)$ (смысл этих параметров раскрывается в описании алгоритма A_3).

Символ " $:=$ " обозначает операцию присваивания значения (левой переменной). Символ " $\in$ ", встречаемый на месте оператора, обозначает операцию записи элемента в множество. Для произвольных точек t', t'' и произвольного множества M операция $(t', t'') \in M$ означает две операции: $\langle t', t'' \rangle \in M$ и $\langle t'', t' \rangle \in M$.

Вспомогательные величины: w_1, w_2, w_3, w_4 .

Блок выделения фрагментов формирует фрагментное представление FR изображения. Если в FR появляется фрагмент F , для которого не выполняется $F^* < 4$ & $F^{12} < 4$ & $F^* + F^{12} < 6$, то алгоритм распознавания выдает решение $RES = \emptyset$ (отказ).

В блоке генерации первичного кусочно-линейного представления формируются множество T точек и множество C_0 первичных связей представления TC_0 . На вход блока подается фрагментное представление $FR = \langle F_1, F_2, \dots, F_n \rangle$. В исходном состоянии множества T, C_0 и все F_i^{25} , $i = 1, n$, пусты. Алгоритм генерации состоит в следующем.

Шаг 1. Для $k := 1, 2, \dots, n$: $A_1(F_k)$ (выбираются предварительные номера схем F_k^{30}).

Шаг 2. Для $k := 1, 2, \dots, n$: $A_2(F_k)$ (выбираются окончательные номера схем F_k^{30}).

Шаг 3. Для $k := 1, 2, \dots, n$: $A_3(F_k)$ (формируются множества T и C_0).

Опишем алгоритм A_1 . (Рассматривается фрагмент F .)

Шаг 1. Если $F^{24} < 0$ или $h_0 < 21_0$, то шаг 15.

Шаг 2. Если $F^* = F^{12} = 0$ или $F^* = 3$ или $F^{12} = 3$, то шаг 17.

Шаг 3. Если $h_0 > 0,5H$, то шаг 17.

Шаг 4. Если $h_0 > 0,5H$ и $h_0 > 41_0$ и ($h_0 > 2L$ & $F^{12} > 1$ или $h_0 > 2R$ & $F^* > 1$ или $h_0 > 2L$ & $h_0 > 2R$), то шаг 17.

Шаг 5. Если $F^4 = 0$, то (если $N_4^1 < y_2$ и $N_3^2 > y_1$, то шаг 17; если $N_3^1 \geq y_2$ и $N_4^2 \leq y_1$, то (если $h_0 > 2R$, то шаг 17; шаг 15); если $N_4^1 < y_2$, то шаг 16; шаг 18).

Шаг 6. Если $F^{12} = 0$, то (если $N_1^{11} < y_2$ и $N_1^{10} > y_1$, то шаг 17; если $N_2^{11} \geq y_2$ и $N_1^{10} \leq y_1$, то (если $h_0 > 2L$, то шаг 17; шаг 15); если $N_2^{11} < y_2$, то шаг 16; шаг 18).

Шаг 7. Если $N_1^{11} - N_1^{10} > 2h_1$ или $N_4^3 - N_4^2 > 2h_1$, то шаг 15.

Шаг 8. Если $F^4 = F^{12} = 2$ и $N_4^{20} > N_4^3$ и $N_1^{22} < N_1^{10}$ и $h_1 < F^{11} - F^{10} + 1$ и $h_1 < F^3 - F^2 + 1$, то шаг 15.

Шаг 9. Если $F^4 + F^{12} > 2$ и $h_1 < 2L$ и $N_4^3 > F^{11}$ и $N_1^{10} < F^2$, то шаг 15.

Шаг 10. Если $F^4 = F^{12} = 1$, то (если $N_1^{10} \leq F^{22}$ и $N_1^{11} \geq F^{21}$ и $N_4^2 \geq F^{22}$ и $N_4^3 \leq F^{20}$, то шаг 14; если $N_1^{10} \geq F^{22}$ и $N_1^{11} \leq F^{21}$ и $N_4^2 \leq F^{22}$ и $N_4^3 \geq F^{20}$, то шаг 14; если $h_0 \leq 2L$ или $h_0 \leq 2R$, то (если $N_1^{10} > y_1$ и $N_3^2 > y_1$, то шаг 18; если $N_1^{11} < y_2$ и $N_3^1 < y_2$, то шаг 16; шаг 15)).

Шаг 11. Если $h_0 > 2L$ и $h_0 > 2R$, то (если $N_1^{11} \geq y_2$ и $N_4^2 \leq y_1$ или $N_1^{10} \leq y_1$ и $N_3^2 \geq y_2$, то шаг 15; если $N_1^{10} > y_1$ и $N_1^{11} < y_2$, то (если $N_3^1 \geq y_2$, то шаг 18; если $N_4^2 \leq y_1$, то шаг 16); если $N_4^2 > y_1$ и $N_4^3 < y_2$, то (если $N_1^{11} \geq y_2$, то шаг 18; если $N_1^{10} \leq y_1$, то шаг 16); если $F^4 = 1$ и $N_1^{10} > y_1$ и $N_1^{11} < y_2$ и $N_3^2 - F^{22} \leq h_0/6$ и $F^{20} - N_4^3 \leq h_0/6$, то шаг 14; если $F^{12} = 1$ и $N_3^2 > y_1$ и $N_3^1 < y_2$ и $N_1^{10} - F^{22} \leq h_0/6$ и $F^{20} - N_2^{11} \leq h_0/6$, то шаг 14; шаг 17).

Шаг 12. Если $h_0 > 2L$, то (если $F^4 = 1$ и $N_1^{10} > y_1$ и $N_1^{11} < y_2$, то шаг 14; если $F^{12} = 1$ и $N_3^2 \geq F^{22}$ и $N_3^1 \leq F^{20}$ и $N_1^{10} \leq y_1$ и $N_2^{11} \geq y_2$, то шаг 14; шаг 15);

Шаг 13. Если $h_0 > 2R$, то (если $F^{12} = 1$ и $N_3^2 > y_1$ и $N_3^1 < y_2$, то шаг 14; если $F^4 = 1$ и $N_1^{10} \geq F^{22}$ и $N_1^{11} \leq F^{20}$ и $N_3^2 < y_1$ и $N_4^3 \geq y_2$, то шаг 14; шаг 15);

Шаг 14. Если $N > 3$ или $F^{12} > 2$, то шаг 17; $F^{30} = 0$; шаг 19.

Шаг 15. $F^{30} = 1$; шаг 19.

Шаг 16. $F^{30} = 2$; шаг 19.

Шаг 17. $F^{30} = 3$; шаг 19.

Шаг 18. $F^{30} = 4$.

Шаг 19. Конец.

Опишем алгоритм A_2 . (Рассматривается фрагмент F)

Шаг 1. Если $F^{30} = 3$ и $h_0 > h/2$, то шаг 2; шаг 11.

Шаг 2. для любого фрагмента N_i , $i = 1, 2, 3, 4$ (если $N_i^{20} - N_i^{22} + 1 > h_i$ и $N_i^{20} - N_i^{22} + 1 > 2(N_i^0 - N_i^1 + 1)$, то шаг 7).

Шаг 3. $w_1 := w_2 := w_3 := w_4 := 1$.

Шаг 4. Если $F^* > 0$, то (если $N_1^{11} - N_1^2 > 1,5(F^1 - N_1^1)$ и $N_1^{22} < F^{22} - h_0/16$, то $w_1 := 0$; если $N_2^3 - N_2^{10} > 1,5(F^1 - N_2^1)$ и $N_2^{20} > F^{20} + h_0/16$, то $w_2 := 0$).

Шаг 5. Если $F^{12} \geq 0$, то (если $N_3^3 - N_3^{10} > 1,5(N_3^9 - F^9)$ и $N_3^{22} < F^{22} - h_0/16$, то $w_3 := 0$; если $N_4^{11} - N_4^2 > 1,5(N_4^9 - F^9)$ и $N_4^{20} > F^{20} + h_0/16$, то $w_4 := 0$).

Шаг 6. Если $w_3 = 0$, то $w_1 := 0$.

Шаг 7. Если $w_4 = 0$ и $w_2 = 1$, то (если $N_4^* > 1$, то $N_4^{30} := 2$; если $F^* > 0$ и $N_2^{10} > y_0$ и $F^{20} \geq y_2 - h/4$, то $w_4 := 1$).

Шаг 8. Если $w_4 = 0$, то $w_2 := 0$.

Шаг 9. Если $w_1 = 0$, то (если $w_2 = 0$, то шаг I4; шаг I5).

Шаг 10. Если $w_2 = 0$, то шаг I6; шаг I7.

Шаг 11. Если $F^{30} \neq 0$ или $F^* \neq 1$ или $F^{12} \neq 1$, то шаг I7.

Шаг 12. Если $N_1^{30} = 0$ и $N_3^{30} > 0$ и $(N_3^3 > y_0 \& N_4^{20} > N_4^3)$ или $N_3^3 < y_0 \& N_3^{22} < N_3^3$, то шаг I4.

Шаг 13. Если $N_3^{30} = 0$ и $N_1^{30} > 0$ и $(N_1^{10} > y_0 \& N_2^{20} > N_2^{11})$ или $N_1^{11} < y_0 \& N_1^{22} < N_1^{10}$, то шаг I4; шаг I7.

Шаг 14. $F^{30} := 1$; шаг I7.

Шаг 15. $F^{30} := 2$; шаг I7.

Шаг 16. $F^{30} := 4$.

Шаг 17. Конеч.

Опишем алгоритм A_3 . (Рассматривается фрагмент F).

Шаг 1. Если $F^{30} \neq 1$, то шаг 8.

Шаг 2. $\tau_5 \in T$; если $F^{24} = 1$, то шаг 6.

Шаг 3. Если $F^* = 0$ и $r(\tau_1, \tau_5) > h_1/2$, то $(\tau_1 \in T; (\tau_1, \tau_5) \in C_0)$.

Шаг 4. Если $F^{12} = 0$ и $r(\tau_2, \tau_5) > h_1/2$, то $(\tau_2 \in T; (\tau_2, \tau_5) \in C_0)$.

Шаг 5. Если $F^* = F^{12} = 0$ и $\tau_1 \notin T$ и $\tau_2 \notin T$, то (если $y(\tau_5) - F^{22} > h/16$, то $(\tau_3 \in T; (\tau_3, \tau_5) \in C_0)$; если $F^{20} - y(\tau_5) > h/16$, то $(\tau_4 \in T; (\tau_4, \tau_5) \in C_0)$).

Шаг 6. Для каждой точки t из F^{25} : $(t, \tau_5) \in C_0$.

Шаг 7. $P(\tau_5) := F^{11}$; $Q(\tau_5) := F^{10}$; для $i := 13, 14, 15$: если $F^i \neq \emptyset$, то $\tau_i \in (F^i)^{25}$; шаг 2I.

Шаг 8. Если $F^{30} \neq 2$, то шаг I0.

Шаг 9. $\tau_4 \in T$; $\tau_6 \in T$; $(\tau_4, \tau_6) \in C_0$; шаг I4.

Шаг 10. Если $F^{30} \neq 3$, то шаг I2.

Шаг 11. $\tau_3 \in T$; $\tau_4 \in T$; $\tau_6 \in T$; $(\tau_3, \tau_6) \in C_0$; $(\tau_4, \tau_6) \in C_0$; шаг I4.

Шаг 12. Если $F^{30} \neq 4$, то шаг 16.

Шаг 13. $\tau_3 \in T$; $\tau_6 \in T$; $(\tau_3, \tau_6) \in C_0$.

Шаг 14. Для каждой точки t из F^{25} : (если $P(t) - y_2 \geq y_2 - Q(t)$, то $w_1 := \tau_3$, иначе если $P(t) - y_1 \leq y_1 - Q(t)$, то $w_1 := \tau_3$, иначе $w_1 := \tau_6$; если $w_1 \notin T$, то $w_1 := \tau_6$; $(t, w_1) \in C_0$).

Шаг 15. $P(\tau_3) := Q(\tau_6) := y_1$; $Q(\tau_3) := F^{22}$; $P(\tau_6) := F^{20}$; $Q(\tau_6) := P(\tau_6) := y_2$; для $i := 13, 14, 15$: если $F^i \neq \emptyset$, то (если $(F^i)^3 - y_2 \geq y_2 - (F^i)^2$, то $w_1 := \tau_4$, иначе если $(F^i)^3 - y_1 \leq y_1 - (F^i)^2$, то $w_1 := \tau_3$, иначе $w_1 := \tau_6$; если $w_1 \notin T$, то $w_1 := \tau_6$; $w_1 \in (F^i)^{25}$); шаг 21.

Шаг 16. Упорядочим точки из $F^{25} = \{w_1, \dots, w_N\}$ так, что для любого i , $1 < i \leq N$, справедливо $P(w_i) - P(w_{i-1}) \geq Q(w_{i-1}) - Q(w_i)$.

Шаг 17. Если $F^{12} = 1$, то (для каждой точки t из F^{25} : $t \in N_3^{25}$; шаг 21).

Шаг 18. Если $N = 1$, то ($w_1 \in N_3^{25}$; $w_1 \in N_4^{25}$; шаг 21).

Шаг 19. Если $N = 2$, то ($w_1 \in N_3^{25}$; $w_2 \in N_4^{25}$; если $Q(w_2) - N_3^3 < N_4^2 - P(w_1)$, то $w_2 \in N_3^{25}$, иначе $w_1 \in N_4^{25}$; шаг 21).

Шаг 20. $w_1 \in N_3^{25}$; $w_3 \in N_4^{25}$; если $N_3^2 \geq Q(w_2)$, то ($w_2 \in N_3^{25}$; $w_3 \in N_3^{25}$), иначе если $N_4^3 \leq P(w_2)$, то ($w_1 \in N_4^{25}$; $w_2 \in N_4^{25}$), иначе ($w_2 \in N_3^{25}$; $w_2 \in N_4^{25}$).

Шаг 21. Конец.

Блок генерации достроенных отрезков формирует множество S всех отрезков, чем заканчивается формирование кусочно-линейного представления ТС изображения.

§4. Блок анализа кусочно-линейного представления

Длина связи $\langle t_1, t_2 \rangle$ есть расстояние между точками t_1 и t_2 . Длина $l(L)$ линии L есть сумма длин всех связей, используемых в L . Первичная длина $p(L)$ линии L есть сумма длин всех первичных связей, используемых в L . Эффективная длина $d(L)$ линии L есть величина $p(L) - (l(L) - p(L))$. Через LC_0 обозначается полусумма длин всех первичных связей.

Направление $\vec{E}$ есть вектор в рецепторном поле (на плоскости). Направление $\vec{E}_1$ относительно направления $\vec{E}_2$ (обозначается через E_1/E_2) есть величина такая, что: а) для любых $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ выполняется $-\pi < E_1/E_2 \leq \pi$, б) направление $\vec{E}_2$ при повороте по часовой стрелке на угол E_1/E_2 совпадает с направлением $\vec{E}_1$. Вектор

$\vec{E}_0$ - вертикальное направление, идущее снизу вверх; $\vec{E}(t_1, t_2)$ - направление от точки t_1 к точке t_2 . Для любого направления $\vec{E}$ через E обозначается E/E_0 .

Пусть M - множество точек. Тогда через $X_1(M)$, $X_2(M)$, $Y_1(M)$ и $Y_2(M)$ будут обозначаться минимальная x -координата, максимальная x -координата, минимальная y -координата и максимальная y -координата точек из M соответственно. Величина $H(M)$ есть $Y_2(M) - Y_1(M)$, а $B(M)$ есть $X_2(M) - X_1(M)$. Если M есть множество T точек представления TC , то подвыражение (M) в вышеуказанных обозначениях опускается (здесь символы H , Y_1 и Y_2 меняют свой смысл, см. §1 и §3). Порог p_0 равен величине $(Y_2 - Y_1 + X_2 - X_1)/16$.

Линии конфигураций, имеющие номер i , обозначаются через L_i , а окружности в этих линиях, если они есть - через O_i . При указании числа n_i точек в линии L_i последняя обозначается через $L_i(n_i)$, а при указании точек этой линии - через $\langle t_1^i, t_2^i, \dots, t_{n_i}^i \rangle$. Верхний индекс в обозначении точек линии может опускаться, если из контекста ясно, к какой линии принадлежат эти точки. Предполагается, что все точки, о которых идет речь ниже - это точки из T .

Точка t порождена фрагментом F , если принадлежность этой точки множеству T обусловлена наличием F в FR (см. алгоритм A_3 из §3). Фрагмент, которым порождена точка t , будем обозначать через $F(t)$.

Кусочно-линейное представление TC изображения содержит в себе, как правило, несколько конфигураций. Более того, каждая конфигурация может быть представлена в TC несколькими своими экземплярами, различными в силу различия входящих в них линий. Выделение (из TC) экземпляра конфигурации происходит путем последовательного поиска всех линий экземпляра и последующей проверки выделенного множества линий на соответствие описанию конфигурации. Процедура поиска конфигураций, реализованная в алгоритме распознавания, полна в том смысле, что находятся все экземпляры конфигураций, существующие в TC .

Поиск линии конфигурации осуществляется в следующем порядке: сначала ищется начальная точка (линии), удовлетворяющая начальному условию этой линии конфигурации, а затем поочередно находятся последующие точки t_i , $i > 1$, удовлетворяющие условию продолжения линии конфигурации. Одна из последующих точек, удовлетворяющая конечному условию, принимается за конечную точку искомой линии.

Точку t_n будем называть тупиковой для искомой линии L , если в T не существует точки t такой, что t удовлетворяет условию продолжения линии L и связь $\langle t_n, t \rangle$ является первичной.

В описаниях блоков выделения и анализа конфигураций приведены только условия, используемые при поиске линий, и описания конфигураций. Это обусловлено тем, что только такая информация существенна с распознавательной точки зрения (в отличие от информации, связанной с организацией вычислений, важной с программистской точки зрения). В записи любого описания и условия предполагается, что высказывания, пронумерованные цифрами 1), 2), ..., соединены знаками конъюнкции.

Рассмотрим блок выделения и анализа конфигураций I типа.

Начальное условие линии L_1 :

$$1) y(t_1) > Y_2 - N/4;$$

$$2) \forall t (y(t) > Y_2 - N/4 \ \& \ \langle t, t_1 \rangle \in C_0 \rightarrow x(t) < x(t_1) \vee (x(t) = x(t_1) \ \& \ y(t) > y(t_1))).$$

Условие продолжения линии L_1 имеет вид $z_1(i) \vee z_2$, где $z_1(i)$ есть: $E(t_{i-1}, t_i) / E(t_{i-2}, t_{i-1}) < 0,4 \vee r(t_{i-1}, t_i) < p_0$, а z_2 есть $z_1(i-1)$ и

$$1) (E(t_{i-1}, t_i) \leq 0 \leftrightarrow E(t_{i-1}, t_{i-2}) \leq 0) \rightarrow |x(t_i) - x(t_{i-1})| < (X_2 - X_1)/3;$$

$$2) (-\pi/2 < E(t_{i-1}, t_i) \leq \pi/2 \leftrightarrow -\pi/2 < E(t_{i-1}, t_{i-2}) \leq \pi/2) \rightarrow |y(t_i) - y(t_{i-1})| < (Y_2 - Y_1)/3, \text{ где при } j < 1 \text{ } E(t_j, t_{j+1}) = 0 \ \& \ z_1(j).$$

Конечное условие линии L_1 : $t_i \in L_1(i-1)$.

Начальное условие линии L_2 : $t_1^2 \in L_1$ и $y(t_1^2) < (Y_1(L_1) + Y_2(L_1))/2$.

Условие продолжения линии L_2 совпадает с условием продолжения линии L_1 .

Конечное условие линии L_2 : в KI.2 - $t_i \in L_1$; в KI.3 - $t_i \in L_2(i-1)$.

Описание конфигурации KI.I:

$$1) p(L_1(n_1)) > 0,75LC_0 \ \& \ 4p(L_1) > 3l(L_1) \ \& \ Y_1(L_1) < Y_1 + N/4;$$

$$2) N(L_1) < 6N(O_1) \ \& \ N(L_1) < 5B(L_1);$$

3) если $N(O_1) \leq 0,8 N(L_1)$, то данный экземпляр определяет цифру 6;

4) если $N(O_1) > 0,8 N(L_1)$, то (если $x(t_{n_1}) - X_1(L_1) < (x(t_1) - X_1(L_1))/4$ и $p(L_1) > 0,9 LC_0$ и $0,7 N(L_1) > y(t_{n_1-1}) - Y_1(L_1)$ и $y(t_{n_1-1}) < y(t_{n_1})$, то данный экземпляр определяет цифру 6, иначе данный экземпляр определяет цифру 0).

Описание конфигураций К1.2 и К1.3:

$$1) p(L_1(n_1)) + p(L_2(n_2)) > 0,75LC_0 \& 4p(L_1) > 3l(L_1) \& 4p(L_2) > 3l(L_2);$$

$$2) Y_1(L_1) \geq Y_1 + H/4 \& H(O_1) > 0,5 H(L_1) \& H(L_1) < 5B(L_1);$$

$$3) \forall i(1 < i < n_2 \rightarrow t_i^2 \notin L_1);$$

$$4) Y_1(L_2) < Y_1 + H/4 \& H(L_2) > H/4 \& H(L_2) < 5B(L_2);$$

$$5) |y(t_1^2) - y(t_{n_2}^2)| > H/4 \rightarrow Y_1 + H/4 < y(t_1^2) < Y_2 - H/4 \& Y_1 + H/4 < y(t_{n_2}^2) < Y_2 - H/4.$$

Для блока выделения и анализа конфигураций П типа начальное условие линии L_1 :

$$1) y(t_1) < Y_1 + H/4;$$

$$2) \forall t(y(t) < Y_1 + H/4 \& \langle t, t_1 \rangle \in C_0 \rightarrow x(t) > x(t_1) \vee (x(t) = x(t_1) \& y(t) < y(t_1))).$$

Условие продолжения линии L_1 совпадает с условием продолжения линии L_1 в К1.1-К1.3, если в последнем выражение $E(t_j, t_{j+1}) = 0$ заменить выражением $E(t_j, t_{j+1}) = \pi$.

Конечное условие линии L_1 : в К2.1, К2.4, К2.5 - $\langle t_{i-1}, t_i \rangle \in C_0$ & (t_i - тупиковая точка); в К2.2, К2.3 - $t_i \in L_1(i-1)$.

Начальное условие линии L_2 : $t_1^2 \in L_1 \& y(t_1^2) > Y_2(L_1) - H(L_1)/3$.

Условие продолжения линии L_2 совпадает с условием продолжения линии L_1 в К1.1-К1.3, если в последнем выражение $E(t_j, t_{j+1}) = 0$ заменить выражением $E(t_j, t_{j+1}) = \pi/4$.

Конечное условие линии L_2 совпадает с конечным условием линии L_1 в К2.1.

Начальное условие линии L_3 : $t_1^3 \in L_1 \& y(t_1^3) < Y_1(L_1) + H(L_1)/2$.

Условие продолжения линии L_3 : $t_i \notin L_1 \& 0 < E(t_{i-1}, t_i) < \pi$.

Конечное условие линии L_3 совпадает с конечным условием линии L_1 в К2.1.

Начальное условие линии L_4 совпадает с начальным условием линии L_2 .

Условие продолжения линии L_4 : $t_i \notin L_1 \& (i=2 \rightarrow -\pi/4 < E(t_{i-1}, t_i) < \pi) \& (i>2 \rightarrow 0 < E(t_{i-1}, t_i) < \pi)$.

Конечное условие линии L_4 совпадает с конечным условием линии L_1 в К2.1.

Описание конфигурации К2.1:

$$1) p(L_1(n_1)) + p(L_3(n_3)) > 0,75 LC_0 \& 4p(L_1) > 3l(L_1) \& 4p(L_3) > 3l(L_3);$$

$$2) Y_2(L_1) > Y_2 - H/4 \& B(L_1) > B/4;$$

$$3) x(t_1^1) < x_2(L_1) \& x_2(L_1) - x(t_{n_1}^1) > B(L_1)/4 \& E(t_{n_1-1}^1, t_{n_1}^1) < 0;$$

$$4) B(L_3) > (X_2(L_1) - X_1(L_3))/2 \& B(L_3) > B(L_1)/2;$$

$$5) \pi/2 < E(t_1^3, t_n^3) < 3\pi/2,$$

Описание конфигурации K2.2:

$$1) p(L_1(n_1)) > 0,75LC_0 \& 4p(L_1) > 31(L_1);$$

$$2) Y_2(L_1) > Y_2 - H/4 \& H(L_1) < 5B(L_1) \& B(L_1) > B/2;$$

$$3) H(L_1)/4 < H(O_1) < 0,8 H(L_1).$$

Описание конфигурации K2.3:

1) п.1 и п.2 описания K2.1;

2) п.3 описания K2.2;

$$3) B(L_3) > x(t_1^3) - x(t_1^1) \& B(L_3) > B(L_1)/3;$$

4) п.5 описания K2.1.

Описание конфигурации K2.4:

$$1) p(L_1(n_1)) + p(L_2(n_2)) > 0,75LC_0 \& 4p(L_1) > 31(L_1) \& 4p(L_2) > 31(L_2);$$

$$2) \forall i (1 < i \leq n_2 \rightarrow t_i^2 \in L_1);$$

$$3) Y_2(L_1) < Y_2 - H/4 \& H(L_1) > H/4 \& B(L_1) > B/4;$$

$$4) x(t_1^1) < X_2(L_1) \& x(t_{n_1}^1) < X_2(L_1) \& E(t_{n_1-1}^1, t_{n_1}^1) < 0;$$

$$5) Y_2(L_2) > Y_2 - H/4 \& Y_1(L_2) \geq y(t_1^2);$$

$$6) \exists i, j (1 < i < j \& x(t_i^2) = X_2(L_2) \& 0 < E(t_1^2, t_i^2) < \pi/2 \& x(t_j^2) < X_2(L_2) \& \forall k (k > i \rightarrow x(t_k^2) < X_2(L_2) \& y(t_k^2) > y(t_1^2))) .$$

Описание конфигурации K2.5:

$$1) p(L_1(n_1)) + p(L_4(n_4)) > 0,75 LC_0 \& 4p(L_1) > 31(L_1) \& 4p(L_4) > 31(L_4);$$

2) п.3 и п.4 описания K2.4;

$$3) Y_2(L_4) > Y_2 - H/4 \& Y_1(L_4) \geq y(t_1^4) \& Y_2(L_4) - Y_2(L_1) < 2B(L_4);$$

$$4) X_2(L_4) - x(t_{n_1}^1) > B/2 \& X_2(L_4) - x(t_1^4) > (x(t_1^1) - x(t_{n_1}^1)) \times 3.$$

Для блока выделения и анализа конфигураций III типа начальное условие линии L_1 : $y(t_1^1) < Y_1 + H/4 \& \forall t (t_1^1, t) \in C_0 \rightarrow -2,1 < E(t_1^1, t) < 2,4$.

Условие продолжения линии L_1 : $-0,8 \leq E(t_{i-1}, t_i) \leq 1,1 \forall (i > 1 \& r(t_{i-1}, t_i) < p_0)$.

Конечное условие линии L_1 : t_i - тупиковая точка.

Начальное условие линии L_2 : в K3.1, K3.2 - $t_1^2 \in L_1 \& y(t_1^2) > Y_2(L_1) - H(L_1)/3$; в K3.3, K3.4 - $t_1^2 \in L_1 \& y(t_1^2) > Y_1(L_1) + H(L_1)/4$.

Условие продолжения линии L_2 : в КЗ.1, КЗ.2 - $t_1 \notin L_1$ & $E(t_{i-1}, t_1) < 0$; в КЗ.3 - $t_1 \notin L_1$ & ($i = 2 \rightarrow E(t_{i-1}, t_1) < 0$); в КЗ.4 - $i = 2 \rightarrow E(t_{i-1}, t_1) < 0$.

Конечное условие линии L_2 : в КЗ.1, КЗ.2, КЗ.3 - $\langle t_{i-1}, t_1 \rangle \in C_0$ & (t_1 - тупиковая точка); в КЗ.4 - $t_1 \in L_1$.

Начальное условие линии L_3 :

$$1) t_1^3 \in L_1 \rightarrow Y_1(L_1) + H(L_1)/4 \leq Y(t_1^3) \leq Y_2(L_1) - H(L_1)/3;$$

$$2) t_1^3 \notin L_1 \rightarrow \forall t(\langle t, t_1^3 \rangle \in C_0 \rightarrow x(t) \leq x(t_1^3)).$$

Условие продолжения линии L_3 : $E(t_{i-1}, t_1) < 0$.

Конечное условие линии L_3 : ($t_1^3 \notin L_1 \rightarrow t_1 \in L_1$) $\vee$ ($\langle t_{i-1}, t_1 \rangle \in C_0$ & (t_1 - тупиковая точка)).

Начальное условие линии L_4 :

$$1) t_1^4 \in L_1 \rightarrow Y(t_1^4) < Y_1(L_1) + H(L_1)/4;$$

$$2) t_1^4 \notin L_1 \rightarrow \forall t(\langle t, t_1^4 \rangle \in C_0 \rightarrow x(t) \leq x(t_1^4)).$$

Условие продолжения линии L_4 : $E(t_{i-1}, t_1) < 0$.

Конечное условие линии L_4 : ($t_1^4 \notin L_1 \rightarrow t_1 \in L_1$) $\vee$ ($\langle t_{i-1}, t_1 \rangle \in C_0$ & (t_1 - тупиковая точка)).

Назовем центром τ линии $L = \langle t_1, t_2, \dots, t_n \rangle$ точку такую, что при $\alpha = (1(L)/2 - 1(L(i)))/r(t_i, t_{i+1})$

$$x(\tau) = \begin{cases} x(t_i) + \alpha (x(t_{i+1}) - x(t_i)), & \text{если } x(t_{i+1}) \neq x(t_i), \\ x(t_i), & \text{если } x(t_{i+1}) = x(t_i); \end{cases}$$

$$y(\tau) = \begin{cases} y(t_i) + \alpha (y(t_{i+1}) - y(t_i)), & \text{если } y(t_{i+1}) \neq y(t_i), \\ y(t_i), & \text{если } y(t_{i+1}) = y(t_i), \end{cases}$$

где номер i выбран так, что $1(L(i)) < 1(L)/2 \leq 1(L(i+1))$.

Введем обозначения и соглашения:

1) τ_i - центр линии L_i ;

2) $E_{11} = E(t_1^1, \tau_1)$, $E_{12} = E(t_1^1, t_{n_1}^1)$, $E_{21} = E(t_1^2, \tau_2)$, $E_{22} = E(t_1^2, t_{n_2}^2)$;

3) $t_{k_2}^2$ - нижняя точка среди всех точек из линии L_2 , x -координата которых равна $X_1(L_2)$; если $k_2 = n_2$, то $L_{22} = \emptyset$, иначе $L_{22} = \langle t_{k_2}^2, t_{k_2+1}^2, \dots, t_{n_2}^2 \rangle$ и $E_{221} = E(t_{k_2}^2, \tau_{22})$ и $E_{222} = E(t_{k_2}^2, t_{n_2}^2)$;

4) $t_{k_3}^3$ - точка из L_3 , такая, что $t_{k_3}^3 \in L_1$, если $k_3 = n_3$, то $L_{3,2} = \emptyset$, иначе $L_{3,2} = \langle t_{k_3}^3, t_{k_3+1}^3, \dots, t_{n_3}^3 \rangle$ и $E_{3,21} = E(t_{k_3}^3, \tau_{3,2})$ и $E_{3,22} = E(t_{k_3}^3, t_{n_3}^3)$; если $k_3 = 1$, то $L_{3,1} = \emptyset$, иначе $L_{3,1} = \langle t_1^3, t_2^3, \dots, t_{k_3}^3 \rangle$ и $E_{3,11} = E(t_1^3, \tau_{3,1})$ и $E_{3,12} = E(t_1^3, t_{k_3}^3)$;

5) аналогично тому, что было сделано в п.4 для линии L_3 , для линии L_4 вводятся: точка $t_{k_4}^4$, линии $L_{4,2}$ и $L_{4,1}$, направления $\vec{E}_{4,21}$, $\vec{E}_{4,22}$, $\vec{E}_{4,11}$ и $\vec{E}_{4,12}$;

6) Пусть точки t_1 и t_2 таковы, что $\langle t_1, t_2 \rangle \in C_0$, $x(t_1) \neq x(t_2)$ и во фрагментном представлении FR существует единственный фрагмент F_k , с которым $F(t_1)$ сцеплен справа, если $x(t_1) < x(t_2)$, сцеплен слева, если $x(t_1) > x(t_2)$. При выполнении этих условий через $F(t_1, t_2)$ будем обозначать фрагмент F_k , если $F_k \neq F(t_2)$ и фрагмент $F(t_1)$, если $F_k = F(t_2)$. Если точки t_1 и t_2 не удовлетворяют исходным условиям, то полагаем, что фрагмент $F(t_1, t_2)$ не существует.

Общие замечания относительно конфигураций КЗ.1 - КЗ.4:

1) в КЗ.1 линия L_2 может отсутствовать (в этом случае полагается $L_2 = \emptyset$);

2) в КЗ.1 - КЗ.4 линия L_4 может отсутствовать;

3) каждая из непустых линий $L_2(n_2)$, $L_3(n_3)$ и $L_4(n_4)$ имеет с линией $L_1(n_1)$ только одну общую точку, исключение составляет линия L_2 в КЗ.4, имеющая точно две общие точки с L_1 , причем в этом случае $n_2 > 2$, $t_1^2 \in L_1$ и $t_{n_2}^2 \in L_1$;

4) линии L_2 , L_3 и L_4 попарно не имеют общих точек;

5) для каждой линии L из $\{L_1, L_2, L_3, L_4, L_{3,1}, L_{3,2}, L_{4,1}, L_{4,2}\}$, если $L \neq \emptyset$, то $4p(L) > 3l(L)$;

6) сумма первичных длин всех непустых линий конфигураций не меньше $0,8 LC_0$;

7) линия L_1 такова, что $-0,2 < E_{12}/E_{11} < 0,4$;

8) линия L_1 такова, что $H(L_1) > 0,75 H$, исключение составляет только линия L_1 в КЗ.3, где справедливо $H(L_1) > H/3$ & $(H(L_1) \leq 0,75 H \rightarrow y(t_{n_2}^2) - y(t_1^2) > 0,75 H)$;

Описание конфигурации КЗ.1:

1) $L_4 \neq \emptyset \rightarrow (Y_2(L_4) < Y_1(L_1) + H(L_1)/4$ & $(L_{4,1} \neq \emptyset \& L_{4,2} = \emptyset \rightarrow$

$\rightarrow B(L_{*1}) < H(L_1)/4 \& (L_{*1} = \emptyset \& L_{*2} \neq \emptyset \rightarrow B(L_{*2}) < H(L_1)/4 \& (L_{*1} \neq \emptyset \& L_{*2} \neq \emptyset \rightarrow B(L_{*2})/3 < B(L_{*1}) < 3B(L_{*2}) \& (B(L_{*1}) > 2B(L_{*2}) \rightarrow E_{*12}/E_{*11} < 0,1))$;

2) если $L_2 = \emptyset$, то данный экземпляр определяет цифру 1;

3) если $L_2 \neq \emptyset$ и $n_2 = 2$ и фрагмент $F(t_2^2, t_1^2)$ существует, то высота правого сегмента этого фрагмента не больше четверти высоты рецепторного представления R изображения;

4) если $L_2 \neq \emptyset$ и $B(L_2) \leq H(L_1)/4$, то данный экземпляр определяет цифру 1;

5) $L_2 \neq \emptyset \rightarrow -0,2 < E_{22}/E_{21} < 0,4$;

6) если $L_2 \neq \emptyset \& B(L_2) > H(L_1)/4$ и $|E_{22}/E_{21}| < 0,2$ и $(E_{22} > -2,0 \rightarrow E(t_{n_1}^1, t_{n_2}^2) < -2,4)$, то данный экземпляр определяет цифру 1;

7) если $L_2 \neq \emptyset \& B(L_2) > H(L_1)/4$ и $(E_{22}/E_{21} \geq 0,2$ или $E_{22} > -2,0 \& E(t_{n_1}^1, t_{n_2}^2) \geq -2,4)$, то данный экземпляр определяет цифру 7.

Описание конфигурации КЗ.2:

1) п.1 описания КЗ.1;

2) $Y_1(L_1) + H(L_1)/4 \leq Y(t_k^3) \leq Y_2(L_1) - H(L_1)/3$;

3) $L_{31} = \emptyset \rightarrow E_{322}/E_{321} < 0,1$;

4) $L_{31} \neq \emptyset \rightarrow \forall 1(1 \leq i < k_3 \rightarrow Y(t_i^3) > Y_1(L_1) + H(L_1)/4)$;

5) $B(L_2) > H(L_1)/4 \& -2,2 < E_{22} < -1,2$.

Описание конфигурации КЗ.3:

1) п.1 описание КЗ.1;

2) $k_2 = n_2 \rightarrow Y(t_{n_2}^2) - Y_1(L_2) > H(L_1)/3$;

3) $k_2 < n_2 \rightarrow (Y(t_{n_2}^2) - Y(t_{k_2}^2) > H(L_1)/4 \& E_{222}/E_{221} < 0,1 \& -2,2 < E(t_1^2, t_{k_2}^2) < -1,2)$.

Описание конфигурации КЗ.4:

1) п.1 описания КЗ.1;

2) $k_2 < n_2 \& Y(t_{n_2}^2) - Y(t_1^2) > H(L_1)/3$;

3) $E_{222}/E_{12} < 0,8$;

4) $E_{222}/E_{221} < 0,1 \& -2,2 < E(t_1^2, t_{k_2}^2) < -1,2$.

На вход блока принятия решения поступает множество $\mathcal{O}$ всех экземпляров конфигураций, выделенных при анализе кусочно-линейного представления ТС изображения. Каждый экземпляр ε_i из $\mathcal{O}$ характеризуется своей эффективной длиной $d(\varepsilon_i)$, равной сумме эффективных длин линий этого экземпляра. Кроме того, все конфигурации упорядочиваются по приоритету в соответствии со следующим рядом уменьшения приоритета: КЗ.1, КЗ.2, КЗ.3, КЗ.4, К1.2, К1.3, К1.1, К2.3, К2.2, К2.5, К2.4, К2.1 (ряд получен экспериментально).

Алгоритм принятия решения состоит в следующем.

Шаг 1. Если $\mathcal{O} = \emptyset$, то $RES := \emptyset$, иначе шаг 2.

Шаг 2. Определяется $d_{\max}$ - максимальная длина из всех $d(\varepsilon)$, $\varepsilon \in \mathcal{O}$.

Шаг 3. Из множества $\mathcal{O}$ удаляются все экземпляры, эффективная длина которых меньше $d_{\max}$.

Шаг 4. Если множество $\mathcal{O}$ содержит экземпляры нескольких конфигураций, то в $\mathcal{O}$ оставляются только экземпляры конфигурации с наибольшим приоритетом.

Шаг 5. В качестве решения RES принимается цифра, определяемая конфигурацией экземпляров из $\mathcal{O}$, причем если в $\mathcal{O}$ содержатся экземпляры конфигураций К1.1 и один из экземпляров определяет цифру 0, а другой - цифру 6, то принимается решение "0", а если в $\mathcal{O}$ содержатся экземпляры конфигурации КЗ.1 и один из экземпляров определяет цифру 1, а другой - цифру 7, то принимается решение "отказ".

§5. Экспериментальное исследование алгоритма

Экспериментальный материал содержал 1600 изображений цифр нормализованного почтового индекса, предоставленных Специальным проектно-конструкторским бюро Минсвязи СССР (цифра "0" - 182 изображения, цифра "1" - 240, "2" - 203, "3" - 140, "4" - 193, "5" - 142, "6" - 126, "7" - 103, "8" - 96, и цифра "9" - 175 изображений). Размер рецепторного поля - 26×36 элементов.

Методика эксперимента состояла в следующем. Весь экспериментальный материал был разбит на множества $M_1, M_2, \dots, M_{10}$ объемом 100, 100, 100, 100, 100, 100, 150, 250, 300, 300 изображений соответственно. При проведении эксперимента замерялась характеристика дообучения алгоритма, которая представляет собой пару $\langle F_1(i), F_2(i) \rangle$ экспериментальных функций, одна из которых, $F_1(i)$, есть

процент нераспознанных изображений на множестве $\bigcup_{k=1}^i M_k$, взятом в качестве обучающей выборки, а другая, $F_2(i), i > 1$ - процент нераспознанных изображений на множестве M_1 , взятом в качестве контрольной выборки после обучения алгоритма на $\bigcup_{k=1}^{i-1} M_k$.

Результат экспериментального исследования алгоритма представлен на рис.4. Конечные характеристики распознавания: $F_1(10) = 0,7\%$ (ошибок нет) и $F_2(10) = 1,7\%$.

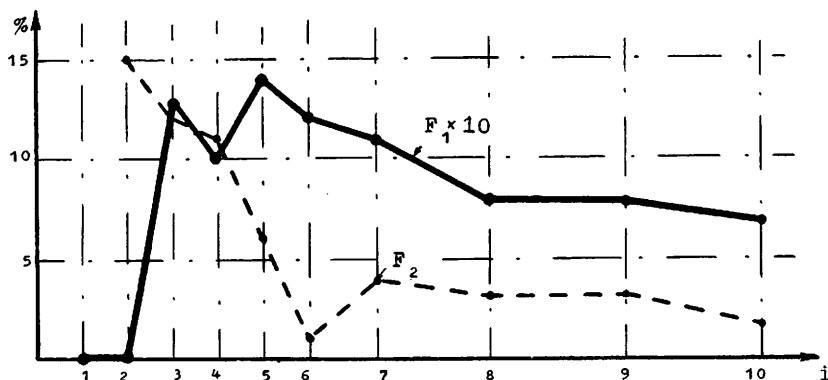


Рис. 4

Основных причин появления ошибок и отказов - три. Одна из них обусловлена слипанием линий цифры в рецепторном представлении изображения, другая - отсутствием слишком больших частей линий цифры и третья - некоторым несовершенством алгоритма формирования первичного кусочно-линейного представления изображений (отказ на цифре 4, см. рис.5). На рис.5 все изображения, при распознавании которых получено решение "отказ", подчеркнуты.

Результаты экспериментального исследования алгоритма распознавания показали его практическую приемлемость как по качеству, так и по времени распознавания (здесь следует учесть, что использование более рациональной организации вычислений и спецпроцессоров позволит уменьшить время распознавания одной цифры до 30 - 50 мсек).

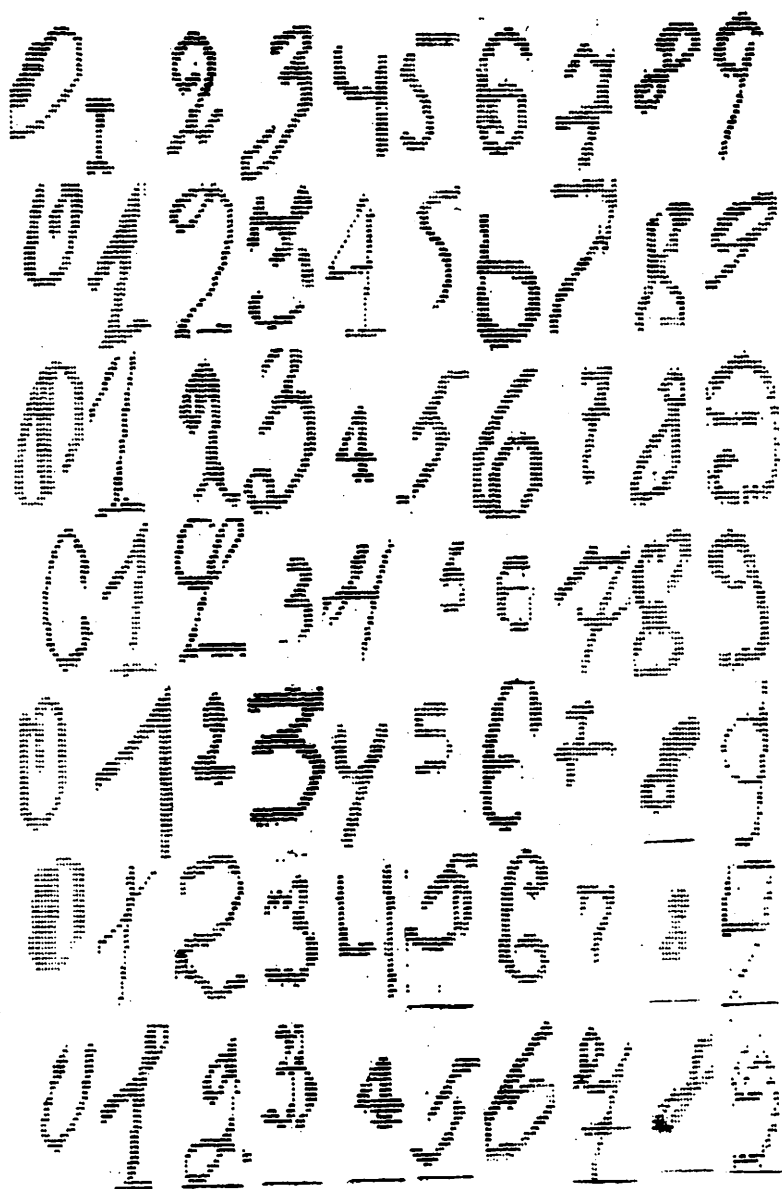


Рис.5. Фрагмент экспериментального материала.

Л и т е р а т у р а

1. A system for the automatic recognition of patterns/Grimsdale R.L., Sumner F.H., Tunis C.I., Kilburn T.- Proc.IEE, 1959, v. 106, N 26, p.210-221.
2. НУДЕЛЬМАН А.С. Квaziпсихологический подход к проблеме распознавания изображений.-В кн.: Вычислительные системы. Вып. 61. Эмпирическое предсказание и распознавание образов.Новосибирск, 1975, с. 83-93.
3. НУДЕЛЬМАН А.С. Алгоритм распознавания нормализованных рукописных и машинописных цифр. -В кн.: Автоматизация ввода письменных знаков в ЦВМ (тезисы докладов IV Всесоюзной конференции). Том I, Каунас, 1977, с. 195-198.

Поступила в ред.-изд.отд.

3 ноября 1981 года