

СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 681.32(075)

Л. С. КОРОЛЮК, Б. П. РУСЫН

(Львов)

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НЕПРОИЗВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Перед разработчиками методов и средств автоматического распознавания образов одна из основных задач, определяющая успех решения проблемы в целом, — построение процедуры формирования системы информативных признаков (СИП). Существующая методика конструирования СИП основана в большей степени на интуитивном, эвристическом подходе, когда основная нагрузка ложится на плечи разработчиков системы распознавания. Связано это с тем, что до сих пор нет единой теории распознавания, а значит нет и трактовки с единых позиций процесса выбора информативных признаков, критериев оценки их эффективности [1].

Процедуру формирования признаков можно разбить на r_n иерархических уровней, количество которых зависит от сложности анализируемых изображений. Первый уровень иерархии r_1 определяется в процессе сканирования изображения, второй и последующие уровни являются результатом функциональных преобразований над полем признаков, сформированных на предыдущих этапах [2, 3]. Однако независимо от метода, применяемого для выбора признаков, пространство входных данных необходимо преобразовать в пространство признаков таким образом, чтобы, во-первых, произвести сжатие информации как при описании образов, так и при формализации процедуры распознавания; во-вторых, отобранные признаки для каждого класса изображений должны образовать компактные непересекающиеся множества. В результате, если I_1 и I_{r_i} — количество информации, характеризующее пространства входных данных и признаков на r_i -уровне, J_{r_i} — информативность на r_i уровне, а $H = \{H_1, H_2, \dots, H_n\}$ — множество сформированных признаков, разделяющее образы на классы $K = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$, где H_i — подмножество признаков, характеризующее класс K_i , то система признаков должна удовлетворять следующим трем условиям:

$$\begin{aligned} I_{r_i} - I_1 &< 0; \\ I_{r_{i+1}} - J_{r_i} &> 0; \\ H_i \cup H_j &\not\subset H_k \text{ при } i \neq j, k = i, j. \end{aligned} \quad (1)$$

Третье условие (1) соответствует случаю $K_i \cap K_j = \emptyset$ при $i \neq j$ и является жестким. Процесс преобразования потока данных в поток признаков можно представить как иерархически пирамидальную структуру (рис. 1), на каждом уровне которой происходит сжатие информации.

При правильном выборе признаков и их конкатенации на каждом последующем уровне иерархии происходит не только уменьшение потока входной информации, но и увеличивается информативность формируемых

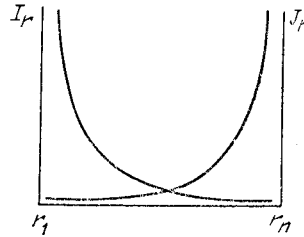
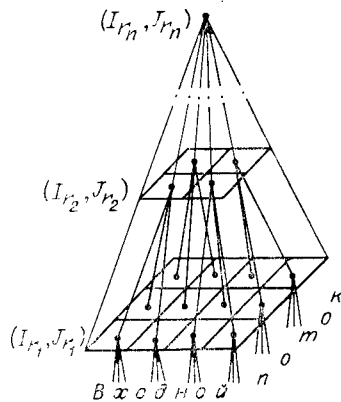


Рис. 2

Рис. 1

признаков. В качестве примера на рис. 2 приведены зависимости количества информации I_r , изображения и информативности J_r признаков от уровня иерархии r , которые соответствуют первому и второму условиям (1).

Удовлетворение выбранных признаков выражению (1) становится особенно важным при построении систем обработки изображений, когда имеем дело со значительным дефицитом времени, в том числе выделенного для операции идентификации производных элементов, из которых состоит любое из анализируемых изображений. Как правило, в качестве производных элементов выбираются области изображения, обладающие сходными энергетическими (распределение яркости) и геометрическими характеристиками. Очевидно, что операция идентификации происходит на самых нижних уровнях r_1, r_2 иерархии формирования СИП. В связи с этим при распознавании образов возникают задачи выбора информативных признаков, в первую очередь инвариантных относительно аффинных преобразований изображений; минимизации числа признаков для каждого конкретного случая идентификации, обеспечивая при этом максимально возможный коэффициент сжатия входной информации.

Формализуем постановку задачи. Введем некоторые обозначения. Пусть $\psi(X)$ — изображение j -го производного элемента ($j = 1, 2, \dots$) ($X \in R^2$); G — группа аффинных преобразований плоскости. Действие регулярного представления этой группы на изображение соответствует его переносам, поворотам, растяжениям (сжатиям) или любой суперпозиции данных преобразований. Если P — некоторое линейное пространство функций, образующее группу преобразований на G , характеризующее производные элементы изображения, то требуется построить такой нелинейный функциональный оператор $L: P \rightarrow T$, где T — линейное пространство над полем R , что $L(\psi(X)) = L(g \circ \psi(X))$ для всех $g \in G$. При этом результаты применения оператора L на P должны удовлетворять условиям в выражении (1).

Представляется важным поиск и подбор сканирующих систем, реализующих оператор L и обладающих простотой в аппаратном исполнении. Это позволяет перенести тяжесть построения нижних уровней СИП непосредственно на процесс предварительной обработки изображений, когда в распознающую систему вводятся не изображения а информация о признаках, которыми описываются производные элементы.

Рассмотрим конструирование СИП на r_1 уровне иерархии. На сегодняшний день по существу наиболее употребляемой для сканирования изображений является телевизионная развертка, хотя известны и другие виды разверток, такие, как непрерывная телевизионная развертка, Z-развертка, спиральная, П-развертка, развертка Гильберта [4]. Последние четыре вида разверток отнесем к так называемым нелинейным сканерам двумерного пространства изображений. Ни один из перечисленных способов извлечения первоначальной информации из изображения не может

претендовать на универсальность. Однако можно утверждать, что в принципе производным элементом более сложного по структуре изображения.

Поскольку большинство изображений производных элементов согласно определению представляется в виде набора областей одинаковой яркости, то естественно считать, что основную информационную нагрузку в этом случае несет на себе его контур [5]. Не уменьшая общности, любой производный элемент изображения полностью определяется уравнением кривой, заданной в неявном виде $f(\varphi, \rho) = 0$ (φ и ρ — полярные координаты) и ограничивающей области изображения с яркостью, изменяющейся в заданных пределах.

Перейдем непосредственно к описанию процесса преобразования изображения путем применения к нему некоторого функционального оператора.

Запишем уравнение спирали Архимеда в полярных координатах

$$\rho = a\varphi,$$

$$\text{где } a = v/\omega; \varphi \in [0; \infty[; \omega = \text{const.} \quad (2)$$

В физической трактовке (2) представляет собой путь, пройденный некоторой материальной точкой, движущейся по лучу с постоянной линейной скоростью v , который вращается с угловой скоростью ω около полюса O с координатами

$$\xi = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i, \quad \eta = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_i,$$

где x_i, y_i — координаты i -й точки изображения; M — количество пикселей в производном элементе. В результате наложения спирали, построенной согласно (2), на оконтуренный производный элемент получаем точки пересечения развертки и контура, координаты которых определяются путем решения уравнения

$$(v/\omega)\varphi - \rho = f(\varphi, \rho). \quad (3)$$

На рис. 3 изображены точки пересечения спиралью контура производного элемента, аппроксимированного n -угольником, стороны которого в полярной системе координат представляются в виде

$$\rho_i = p_i / \cos(\varphi - \gamma_i), \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где p_i — расстояние от полюса до i -й стороны; γ_i — угол между полярной осью и перпендикуляром из полюса на данную сторону.

С учетом (4) уравнение (3) для n -угольника примет вид

$$\frac{v}{\omega} \varphi = \frac{p_i}{\cos(\varphi - \gamma_i)}, \quad i = \overline{1, 2, \dots, n}. \quad (5)$$

Задавая расстояние от полюса до i -й стороны в виде $p_i = vt_i$, где t_i — текущее время от начала развертывания сканирующего луча, и принимая во внимание, что $\varphi = \alpha + 2\pi k$, $0 \leq \alpha \leq 2\pi$, $k = \overline{1, 2, \dots, m}$, окончательно получим систему с $n \times m$ независимых уравнений:

$$\frac{v}{\omega} (\alpha + 2\pi k) = \frac{vt_i}{\cos(\alpha - \gamma_i)}, \quad i = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, m}. \quad (6)$$

Так как в общем случае $v = \text{const}$, $\omega = \text{const}$, а t_i является независимым параметром, то значения координат контура производного элемента определяются с помощью последовательных решений уравнений

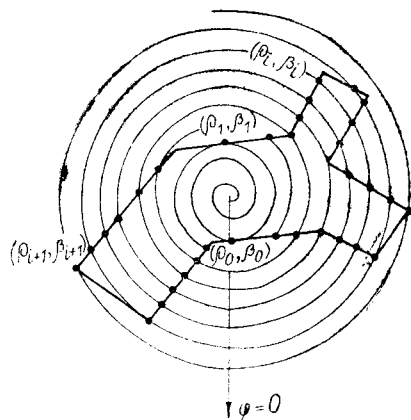


Рис. 3

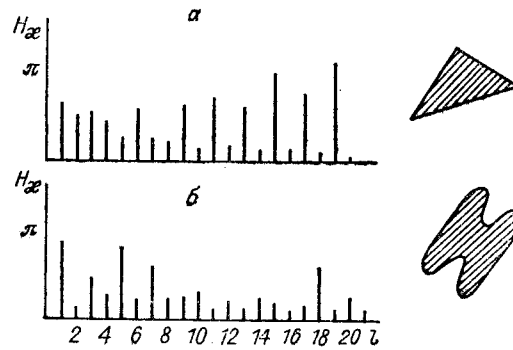


Рис. 4

(6) относительно α . С другой стороны, левая часть (6) является видоизмененным уравнением спирали (2). В силу этого сканирование контура производного элемента и фиксация значений угловой координаты φ в точках последовательного пересечения контура и развертки эквивалентны решению (6). Это обстоятельство используется при реализации функционального оператора L путем сканирования изображения производного элемента.

Опишем алгоритм определения признаков производных элементов и покажем, что признаки удовлетворяют требованиям поставленной задачи.

Процесс сканирования осуществляется с центра масс производного элемента с начальными линейной v_0 и угловой ω_0 скоростями. Первое пересечение сканирующего луча с контуром будет отвечать минимально удаленной от центра масс точке контура с координатами ρ_0, β_0 , причем $\beta_0 = \varphi - 2\pi\tau$, где $\tau = \text{ent}(\varphi/2\pi)$ — количество полных оборотов сканирующего луча, а $\rho_0 = v_0\varphi/\omega_0$. Определение координаты ρ_0 проводится для коррекции линейной скорости v_0 путем ее умножения на «масштабный множитель» $h = \rho_0/\rho_*$ (ρ_* — некоторое эталонное расстояние). Эта операция позволяет получить нормированную развертку, не зависящую от линейных размеров изображения, т. е. сохранить оптимальное соотношение между шагом сканирования и размером анализируемых образов. Координаты всех последующих пересечений определяются с помощью рекурсивной формулы

$$\beta_i = \varphi - \left(\sum_{j=0}^{i-1} \kappa_j + 2\pi\tau \right), \quad (7)$$

где κ_j — разность фаз между текущим и предыдущим пересечениями развертки и контура. В результате получим множество точек

$$H = \{(\rho_0, \beta_0), (\rho_1, \beta_1), \dots, (\rho_l, \beta_l)\},$$

где l — количество «встреч» развертки с контуром.

Представим множество H в виде объединения двух подмножеств

$$H = \{\rho_0, \rho_1, \dots, \rho_l\} \cup \{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_l\}.$$

Поскольку согласно (2) полярная координата определяется через фазу φ_i , а φ_i можно выразить непосредственно из (7) через κ_j , то множество H эквивалентно множеству $H_* \in H$:

$$H_* = \{\kappa_0, \kappa_1, \dots, \kappa_l\},$$

элементами которого являются признаки, описывающие просканированный производный элемент. Следовательно, формирование множества H_* является результатом применения функционального оператора L к контурной функции, т. е. $L(f(\rho, \varphi)) = H_*$. На рис. 4, а, б представлены

два класса изображения производных элементов и соответствующие им признаки в виде дискретных спектров $H_* = f(l)$.

Покажем, что H_* удовлетворяет требованию инвариантности на G , т. е. $\forall f(\rho, \varphi) \in P$ справедливо $L(f(\rho, \varphi)) = L(g \circ f(\rho, \varphi)) = H_*$.

Пусть g_1, g_2, g_3 — соответственно операторы преобразования переноса, поворота и масштабирования изображения. Инвариантность H_* относительно g_1 обеспечивается совмещением центра развертки с центром масс изображения, координаты которого зависят от топологических характеристик изображения. Независимость признаков относительно действия оператора g_2 на $f(\rho, \varphi)$ достигается путем соответствующей ориентации полярной оси данной системы координат или выбором скорости развертывания луча таким образом, чтобы траектория развертки была близкой к окружностям [6].

Пусть в результате действия оператора g_3 на $f(\rho, \varphi) \in P$ точке контура исходного изображения на плоскости X с координатами ρ, Θ соответствует точка контура масштабированного изображения с координатами ρ', Θ' , где $\Theta, \Theta' \in [0, 2\pi]$. Покажем, что $L(f(\rho, \Theta)) = L(f(\rho', \Theta')) = \kappa'$. Так как $\rho' = g_3' \rho$, где g_3' — диагональный элемент матрицы оператора масштабирования g_3 , то согласно (2) $\frac{v}{\omega}(\Theta + 2\pi l_1) = g_3' \frac{v}{\omega}(\Theta' + 2\pi l_2)$, $l_1, l_2 \in \mathbb{N}$. Поскольку точка контура выбрана произвольно, то $g_3' = h$.

Учитывая, что $l_1 = \text{ent}(g_3', l_2)$, окончательно получим $v\Theta/\omega = v\Theta'/\omega$, т. е. $\Theta = \Theta'$. Используя выражение (7), можно сделать вывод, что признак κ зависит от Θ' . Значит, $L(g_3 \circ f(\rho, \Theta')) = L(f(\rho', \Theta'))$.

Сформированное признаковое пространство $\{H_*^i\}_{i=1}^n$ не только инвариантно по отношению к аффинным преобразованиям, но и удовлетворяет третьему условию выражения (1). Для этого достаточно показать, что между линейным пространством функций на P и множеством $\{H_*^i\}_{i=1}^n$ существует однозначное соответствие, т. е.

$$\forall f_i(\rho, \varphi) \in P \exists H_*^i, i = \overline{1, n}; \quad (8)$$

$$\text{если } f_i(\rho, \varphi) \neq f_j(\rho, \varphi), \text{ то } H_*^i \neq H_*^j \text{ при } i \neq j, i, j = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Справедливость предиката (8) следует непосредственно из алгоритма формирования множества признаков H_*^i для произвольной контурной функции $f_i(\rho, \varphi)$.

Для доказательства выражения (9) предположим, что в результате сканирования спиральной разверткой контура производного элемента, заданного функцией $f(\rho, \varphi)$, образуется некоторое множество точек пересечения $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$, причем каждая точка однозначно определяется координатами $\{\rho_i, \Theta_i\}$, $i = 1, 2, \dots, m$. Согласно (7) элементы множества H_* , отвечающие элементам множества C , находятся по формуле

$$\kappa_i = \Theta_i + 2\pi(\tau + s) - \sum_{j=1}^{i-1} \kappa_j - 2\pi\tau = \Theta_i - \sum_{j=1}^{i-1} \kappa_j + 2\pi s, \quad (10)$$

$$\text{где } s = \text{ent} \left[\frac{\sum_{j=1}^{i-1} \kappa_j}{2\pi} \right].$$

Предположим, что $f_i(\rho, \varphi) \neq f_j(\rho, \varphi)$ в точке $c_1' \in C$ с координатами ρ_i', Θ_i' . Согласно (10) этой точке соответствует признак

$$\kappa_i' = \Theta_i' - \sum_{j=1}^{i-1} \kappa_j + 2\pi s. \quad (11)$$

Сравнивая формулы (10) и (11) при $\Theta_i' = \Theta_i$ получим, что $\kappa_i' = \kappa_i$. Поскольку c_1' выбрана произвольно, то $H_*^i \neq H_*^j$.

Отметим, что предлагаемый метод формирования признаков обладает свойством адаптивности, т. е. имеется возможность выбора СИП, исходя

из конкретного набора непроеизводных элементов. Адаптивность достигается регулированием мощности множества H_* за счет изменения параметра ν_0 . Максимальное значение ν_0 определяется из условия разделения непроеизводных элементов на непересекающиеся классы.

В заключение приведем основные результаты работы:

новый подход к формированию СИП непроеизводных элементов изображения удовлетворяет иерархически пирамидальной структуре представления информации;

сконструированная СИП обладает свойством инвариантности относительно аффинных преобразований, что уменьшает избыточность признаков уже на самом нижнем уровне иерархии, т. е. при сканировании изображений;

однозначное соответствие между множеством непроеизводных элементов и признаковым пространством позволяет проводить идентификацию непроеизводных элементов с высокой достоверностью;

предложенный подход дает возможность формировать признаки для непроеизводных элементов, имеющих сложную геометрию контуров.

Перечисленные свойства СИП позволяют строить на их основании высокопроизводительные специализированные средства обработки и распознавания изображений в реальном времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русын Б. П. Структурно-лингвистические методы распознавания изображений в реальном времени.— Киев: Наук. думка, 1986.
2. Анисимов Б. В., Курганов В. Д., Злобин В. К. Распознавание и цифровая обработка изображений.— М.: Высш. шк., 1983.
3. Васильев В. И. Распознающие системы.— Киев: Наук. думка, 1983.
4. Александров В. В., Горский Н. Д. Представление и обработка изображений: Рекурсивный подход.— Л.: Наука, 1985.
5. Техническое зрение роботов/Под ред. А. Пью.— М.: Машиностроение, 1987.
6. Корольюк Л. С., Русын Б. П. Применение спирального метода развертки к распознаванию изображений // V Всесоюз. школа-семинар «Распараллеливание обработки информации».— Львов: ФМИ АН УССР, 1985.

Поступила в редакцию 26 июля 1988 г.

УДК 621.391

Е. П. НЕЧАЕВ, А. П. ТРИФОНОВ

(Воронеж)

ОЦЕНКА ПЛОЩАДИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ НЕИЗВЕСТНЫХ ИНТЕНСИВНОСТЯХ СИГНАЛА И ШУМА

В [1, 2 и др.] рассматривалась задача оценки площади оптических изображений. При этом интенсивности полезного изображения и шума предполагались априори известными. Однако при практической реализации алгоритмов обработки оптических изображений эти интенсивности, как правило, оказываются известными лишь приближенно. Поэтому представляет интерес определить потери в точности оценки площади за счет незнания интенсивностей сигнала и шума, а также найти способ снижения этих потерь.

Зарегистрированное оптическое черно-белое изображение будем описывать пуассоновским полем случайных точек [1—3]. Для фотозлектронного приемника эти точки соответствуют вылетевшим электронам, а для фотоэленок и фотопластинок — светочувствительным центрам, в которых