

УДК 004.932

С.Г. АНТОЩУК, А.А. НИКОЛЕНКО, О.Ю. БАБИЛУНГА, Е.В. ТКАЧЕНКО

Одеський національний політехнічний університет, Україна

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ОБРАЗОВ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Предложена модель формирования образов структурированных объектов на полутоновых изображениях с учетом семантической значимости уровней и объектов на них и рассмотрен подход к ее реализации с использованием вейвлет-преобразования. Разработанная модель позволяет создавать гибкие (нисходящие, восходящие, комбинированные) модели обработки изображений, избегать необходимости многократного сопоставления полученной информации с большим числом моделей в процессе классификации объектов, получить универсальный подход для решения широкого круга прикладных задач.

модель, полутоновые изображения, контурная сегментация, вейвлет-преобразование

Введение

Во многих практических приложениях, таких как контроль качества промышленных изделий, медицинская диагностика, экологический мониторинг и др., используются интеллектуальные системы обработки и распознавания изображений (ИСОРИ), в которых объект распознавания имеет иерархическую структуру: «объект — подобъект — ... — элементарный подобъект». Основной функцией таких систем является извлечение существенной для работы соответствующего приложения информации, вид и форма представления которой определяется еще на этапе проектирования ИСОРИ. Для формального описания структурированного объекта (или процесса) используют модель формирования его образа, правильный выбор которой определяет эффективность работы ИСОРИ. Однако известные модели учитывают, как правило, только особенности объекта распознавания (структуру, размер и др.) [1, 2], что не удовлетворяет возросшим требованиям универсальности и надежности ИСОРИ. Поэтому в статье разработана модель формирования образов структурированных объектов учитывающая как особенности объекта распознавания, так и требования к извлекаемой информации, определяемые

целью обработки (ее семантическую значимость).

1. Модель формирования образов структурированных объектов

Структурированный объект можно представить в виде совокупности изображений разного уровня иерархии (пирамидальное представление) [1]:

$$F(x_1, x_2) = \sum_{j=1}^M I_j(x_1, x_2), \quad (1)$$

где M – количество уровней иерархии на изображении; $I_j(x_1, x_2)$ – изображение на j -м уровне иерархии ($j=1, \dots, M$).

В общем случае изображение $I_j(x_1, x_2)$ на каждом уровне представляет собой совокупность изображений отдельных объектов и фона. Для уменьшения объемов обрабатываемой информации и обеспечения инвариантности к трансформациям интенсивности целесообразно перейти к сигнально-семантической модели пирамидального представления объекта на изображении [2]

$$KP(x, y) = \bigcup_{j=1}^k KP^j(x, y), \quad (2)$$

где $KP(x, y)$ – иерархическое представление контурных препаратов; $KP^j(x, y)$ – контурный препарат на j -м уровне иерархии; k – количество уров-

ней иерархии.

Однако в модели (2) не учтена цель обработки, определяющая степень требуемой детализации объекта на разных уровнях иерархии. Поэтому предлагается ввести параметр $\lambda_j > 0$, определяющий семантическую значимость каждого уровня иерархии для получения описания объекта в целом и тогда выражение (2) преобразуется к виду:

$$KP(x, y) = \bigcup_{j=1}^k \lambda_j KP^j(x, y) . \quad (3)$$

В этом случае в результате проведения процедуры выделения контуров может быть получен маркированный контурный препарат, в котором точки контура каждого уровня иерархии помечены разными числовыми значениями, что может быть использовано в ИСОРИ на этапе анализа и распознавания структуры объекта.

Переходя к контурному описанию ИКО как к совокупности начальных векторов контурных признаков, для учета цели получения информации предлагается ввести λ_{ji} – параметр семантической значимости i -го объекта (подобъекта) на j -ом уровне иерархии (в случае присутствия на данном уровне только одного объекта данный параметр определяет значимость всего уровня)

$$\text{ИКО} = \bigcup_{j=1}^M \bigcup_{i=1}^{N_j} (\mathbf{K}_{ji})_{\lambda_{ji}} , \quad (4)$$

где \mathbf{K}_{ji} – упорядоченное множество точек с координатами $\{x_{1iq}^j, x_{2iq}^j\}$ контура некоторого i -го объекта на плоскости на уровне j ; M – число уровней; N – количество объектов и подобъектов; λ_{ji} – значимость i -го объекта на j -м уровне (от 0 до N).

На множествах \mathbf{K} определено отношение принадлежности, при котором один или несколько подобъектов располагается внутри другого объекта или подобъекта.

На основе модели (4) путем преобразования $v_r(\cdot)$ или композиции преобразований $(\dots(v_2(v_1(\cdot))))$ можно получить топологические

признаки (количество, взаимное расположение объектов или подобъектов), спектральные, геометрические и другие характеристики объекта. Тогда формальное описание объекта с учетом (4) можно представить:

$$\mathbf{C}_{\text{ИКО}} = v_m(\dots(v_2(v_1(\text{ИКО})))) \quad (5)$$

Таким образом, на основании теоретико-множественного подхода, модель формирования образов структурированного объекта имеет вид:

$$\mathbf{МКО} = \{J, \Lambda, I, \chi, \mathbf{C}_{\text{ИКО}}\} , \quad (6)$$

где J – множество уровней иерархии; Λ – множество значений семантической значимости уровней иерархии; I – множество подобъектов; χ – отношение принадлежности, при котором один или несколько подобъектов располагается внутри другого объекта или подобъекта.

2. Особенности реализации модели с использованием вейвлет-преобразования

Базовой процедурой, позволяющей перейти к модели (5) или (6) является контурная сегментация изображений, т.е. контурное описание изображения (4). В [1, 2] показано, что контурное описание на разных уровнях иерархии может быть получено в области вейвлет-преобразования (ВП), для которого свойственна частотно-пространственная локализация.

Процедура иерархической контурной сегментации в области ВП предусматривает два этапа: определение области контура и получение контурного описания. На первом этапе подчеркивают перепад интенсивности, расширяя пространственную локализацию объекта, а затем определяют область контура [3].

Для подчеркивания перепадов может использоваться непрерывное вейвлет-преобразование функции $f(x) \in L^2(R)$ [2]

$$Wf(s, x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-x}{s}\right) dt , \quad (7)$$

где s – масштабный коэффициент; $\psi\left(\frac{t-x}{s}\right)$ – вейвлет, полученный на основании базисной функции $\psi(t)$ с помощью сдвига и изменения масштаба; t – переменная интегрирования.

Для данной задачи могут применяться действительные вейвлеты, заданные в виде симметричных нечетных функций $\psi(t) = -\psi(t)$, имеющие компактный или эффективный носитель, в частности, вейвлеты Гаусса, гиперболическое вейвлет-преобразование и т.д. [1, 4]. Рассмотрим особенности представления перепадов интенсивности в пространстве вейвлет-преобразования.

Учитывая конечные размеры изображения, модель перепада яркости (интенсивности) для строки изображения имеет вид:

$$f(x) = \begin{cases} h_1, & 0 < x < x_0; \\ h_2, & x_0 \leq x \leq x_{\max} \end{cases}, \quad (8)$$

где x_0 – координата перепада, h_1, h_2 – значения интенсивности фона и сигнала соответственно, x_{\max} – длина строки изображения.

Ее вейвлет-преобразование имеет вид

$$Wf(s, x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{x_0} h_1 \psi\left\{\frac{t-x}{s}\right\} dt + \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{x_0}^{x_{\max}} h_2 \psi\left\{\frac{t-x}{s}\right\} dt \quad (9)$$

После замены переменной и интегрирования имеем

$$Wf(s, x) = -\sqrt{s}h_1 F\left(-\frac{x}{s}\right) + \sqrt{s}(h_1 - h_2)F\left(\frac{x_0 - x}{s}\right) + \sqrt{s}h_2 F\left(\frac{x_{\max} - x}{s}\right), \quad (10)$$

где $F(x) = \int \psi(x) dx$ – первообразная $\psi(x)$.

Полученное выражение имеет три составляющие, каждая из которых локализована в окрестности своей точки (0, x_0 , x_{\max} соответственно). Составляющие $-\sqrt{s}h_1 F\left(-\frac{x}{s}\right)$ и $\sqrt{s}h_2 F\left(\frac{x_{\max} - x}{s}\right)$ возник-

ают в связи с краевым эффектом и не учитываются при анализе. Составляющая $\sqrt{s}(h_1 - h_2)F\left(\frac{x_0 - x}{s}\right)$ вызвана наличием перепада и представляет объект анализа. Для нахождения экстремума найдем ее производную:

$$\frac{\partial Wf(s, x)}{\partial x} = -\frac{h_1 - h_2}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{x_0 - x}{s}\right) = 0. \quad (11)$$

Решения уравнения находятся в точке пересечения оси абсцисс – для вейвлета Гаусса $\psi(x) = -xe^{-x^2}$ координата экстремума $x^* = x_0$ совпадает с координатой точки перепада. Таким образом, для отыскания перепадов интенсивности в строке изображения можно выполнить ее непрерывное вейвлет-преобразование и отыскать точки локальных экстремумов.

В реальных изображениях часто встречается протяженный перепад, модель которого может быть представлена в виде

$$f(x) = \begin{cases} h_1, & 0 < x < x_0; \\ h_1 + \frac{h_2 - h_1}{d}(x - x_0), & x_0 \leq x \leq x_0 + d; \\ h_2, & x_0 + d \leq x \leq x_{\max} \end{cases}, \quad (12)$$

где d – протяженность перепада.

Для такого перепада можно после аналогичных математических выкладок получить условие экстремума вейвлет-преобразования строки

$$\frac{1}{\sqrt{s}} \frac{h_2 - h_1}{d} \int_{x_0}^{x_0+d} \psi\left\{\frac{t-x}{s}\right\} dt = 0. \quad (13)$$

Обозначив $z = \frac{t-x}{s}$, решим уравнение (13)

$$\int_{\frac{x_0 - x}{s}}^{\frac{x_0 + d - x}{s}} \psi(z) dz = 0. \quad (14)$$

Функция $\psi(z)$ с точностью до обозначения переменной совпадает с вейвлетом, следовательно, является нечетной функцией. Для нечетной функции интеграл в симметричных пределах равен 0.

Тогда уравнение (14) можно свести к уравнению

$$\frac{x_0 + d - x}{s} = -\frac{x_0 - x}{s}, \quad (15)$$

решение которого $x = x_0 + \frac{d}{2}$.

Таким образом, в точке $x^* = x_0 + \frac{d}{2}$, совпадающей с серединой протяженного перепада, имеет место экстремум ВП при использовании в качестве вейвлета симметричной нечетной функции. Положение экстремума не зависит от масштаба преобразования s .

На рис. 1 представлено для иллюстрации подчеркивание идеального (а) и протяженного (б) перепадов интенсивности с помощью ВП с вейвлетом Гаусса.

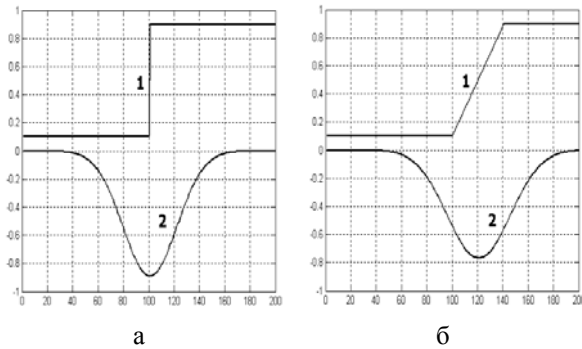


Рис. 1. Подчеркивание идеального (а) и протяженного (б) перепадов интенсивности: 1 – модель перепада; 2 – перепад в пространстве ВП

Таким образом, особенности ВП позволяют использовать его для локализации как идеальных, так и протяженных перепадов интенсивности.

Для возможности реализации сигнально-семантической модели (2) исследуем частотно-избирательные свойства ВП.

Анализ амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) базисных функций (рис.2) показал, что их частотные свойства (положение максимума АЧХ) зависят от масштаба s и с его увеличением смещаются в область низких частот. Это позволяет использовать ВП с рассмотренными базисными функциями для реализации модели формирования обра-

зов (6).

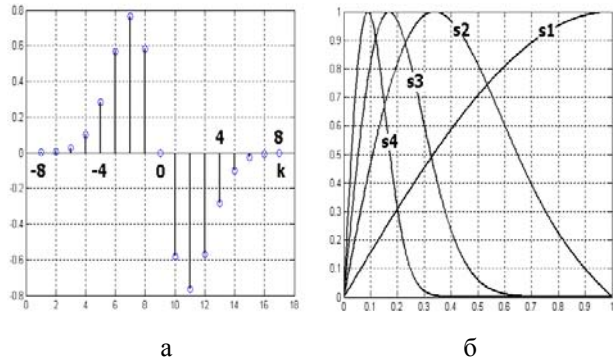


Рис. 2. Импульсная характеристика при масштабе $s_3=17$ (а) и АЧХ вейвлета Гаусса при разных масштабах $s_1 < s_2 < s_3 < s_4$ (б)

3. Контурное описание

Для выполнения второго этапа контурной сегментации – получения контурного описания проводится морфологическая контурная обработка полутоновых изображений с использованием итеративных методов поиска на основе ВП [4] Алгоритм учитывает следующее:

1) для определения сходства пикселей, принадлежащих контуру, используется величина отклика оператора ВП в некоторой точке (x_{1p}, x_{2q}) , который определяется в виде дискретной свертки

$$W_1(x_{1p}, x_{2q}) = \sum_{i=-\gamma s}^{i=\gamma s} u(x_{1p-i}, x_{2q}) \psi_i, \quad (16)$$

$$W_2(x_{1p}, x_{2q}) = \sum_{i=-\gamma s}^{i=\gamma s} u(x_{1p}, x_{2q-i}) \psi_i;$$

2) предполагается непрерывность контура: при небольших - до 3-х пикселей разрывах каждая последующая точка должна лежать в пределах детерминированной, например, единичной окружности по отношению к найденной точке контура;

3) при выборе начального приближения x_k используются значения, полученные на предыдущем шаге (применяются итеративные поисковые методы).

Алгоритм позволяет получить последовательное описание контура путем пространственной морфологической обработки исходного изображения [5]. Пик-

сель изображения (x_1, x_2) может принадлежать контуру, если он сходен с точкой (x_{10}, x_{20}) , уже принадлежащей контуру

$$\Delta W = |W(x_1, x_2) - W(x_{10}, x_{20})| \leq E, \quad (17)$$

где $W(x_1, x_2) = \sqrt{W_1(x_1, x_2)^2 + W_2(x_1, x_2)^2}$;

$W(x_{10}, x_{20}) = \sqrt{W_1(x_{10}, x_{20})^2 + W_2(x_{10}, x_{20})^2}$;

E – некоторая константа (порог).

В этом случае морфологический оператор связывания точек контура X для полутоновых изображений имеет вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_k &= (\mathbf{X}_{k-1} - b) \{WF(\mathbf{X}_k) = \\ &= \max(WF(\mathbf{X}_{k-1} - b)) \& (\Delta WF(\mathbf{X}_k) < E); \\ &b \in \mathbf{B}; \mathbf{X}_k \in D_F\}, \end{aligned} \quad (18)$$

где b – смещение; \mathbf{B} – n -компонентная маска (примитив); D_F – область определения изображения F .

По полученным описаниям объектов K (4) рассчитываются векторы признаков \mathbf{C}_{IKO}^j . Переход к модели формирования образов с учетом семантической значимости (6) позволяет проводить как независимую классификацию на основе векторов признаков образов \mathbf{C}_{IKO}^j и их значимости, так и учитывать пространственные соотношения между образами объектов и подобъектов.

Выводы

Разработанная модель формирования образов структурированных объектов при распознавании полутоновых изображений учитывает как геометрические особенности объекта, так и семантическую значимость его составляющих. Реализации такой модели возможна с применением вейвлет-преобразования, обладающего свойствами частотно-пространственной избирательности, позволяющего выделять информационные элементы объекта (например, контура) с требуемой детализацией. Разработан на базе ВП морфологический оператор,

позволяющий получать контурное описание на разных уровнях иерархии. Использование модели формирования образов с учетом семантической значимости (6) позволяет избежать необходимости многократного сопоставления полученной информации с большим числом эталонов и тем самым повысить быстродействие принятия классификационных решений при распознавании иерархических объектов и анализе сцен.

Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
2. Антошук С.Г. Теоретические и реализационные основы создания адаптивно-критериальных систем построения информационных технологий обработки визуальной информации в АСУ // Автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук, ОНПУ, Одесса, 2005. – 34 с.
3. Бабилунга О.Ю. Модель иерархического формирования образов объектов в системах обработки и распознавания изображений // Электромашинобудовання та електрообладнання. – 2007. – Вип. 69 – С. 56-60.
4. Антошук С.Г., Бабилунга О.Ю., Николенко А.А. Повышение быстродействия контурного описания полутоновых изображений приближенными методами // Тр. Одесск. политехн. ун-та. – 2007. – Вып. 1 (27). – С. 118-123.
5. Антошук С.Г., Бабилунга О.Ю., Николенко А.А. Метод морфологической обработки полутоновых изображений на основе гиперболического вейвлет-преобразования // Электромашинобудовання та електрообладнання. – 2006. – Вип. 67. – С. 119-123.

Поступила в редакцию 19.02.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Ситников, Одесский национальный политехнический университет, Одесса.