УДК 004.932.2:519.68

В.И. Загребнюк, канд. техн. наук, доц.,
Ф.В. Насиров, специалист,
Одес. нац. акад. связи им. А.С. Попова

МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ НА ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

В.И. Загребнюк, Ф.В. Насиров. Метод виділення границь на кольорових зображеннях. Запропоновано метод, який дозволяє ефективно локалізувати контури на кольоровому зображенні, в тому числі границі між текстурними регіонами та границі між регіонами з плавною градієнтною зміною кольору. Метод ґрунтується на сингулярному спектральному аналізі одновимірних випадкових послідовностей і передбачає попередню векторизацію зображення. Для різних орієнтацій границі (горизонтальної, вертикальної і діагональної) метод використовує різні способи векторизації зображення. Метод може бути ефективно використаний в системах комп'ютерного зору в процедурах сегментації цифрових зображень і для виділення регіонів в системах контекстного пошуку зображень по регіонах.

Ключові слова: контекстний пошук зображень по регіонах, локалізація контурів, виділення границь, сингулярний спектральний аналіз, факторний вектор, векторизація зображення.

В.И. Загребнюк, Ф.В. Насиров. Метод выделения границ на цветных изображениях. Предложен метод, который позволяет эффективно локализовать контуры на цветном изображении, включая границы между текстурными регионами и границы между областями с плавным градиентным изменением цвета. Метод основывается на сингулярном спектральном анализе одномерных случайных последовательностей и предполагает предварительную векторизацию изображения. Для различных ориентаций границы (горизонтальной, вертикальной и диагональной) метод использует различные способы векторизации изображения. Метод может быть эффективно использован в системах компьютерного зрения для сегментации цифровых изображений и для выделения регионов изображений в системах контекстного поиска изображений по регионам.

Ключевые слова: контекстный поиск изображений по регионам, локализация контуров, выделение границ, сингулярный спектральный анализ, факторный вектор, векторизация изображения.

V.I. Zagrebnyuk, F.V. Nasirov. The method of edge detection in color images. The method for contour localization in color images is proposed. It is effective when detecting both the boundaries between texture regions and the boundaries between regions with a smooth color change gradient. The method is based on the Singular Spectrum Analysis of one-dimensional random sequences and involves preliminary image vectorization. It uses different ways of image vectorization for different edge orientations (horizontal, vertical and diagonal). The method can be effectively used in computer vision systems for digital image segmentation and also for regions detecting in RBIR-systems.

Keywords: Region-Based Image Retrieval (RBIR), contour localization, edge detection, Singular Spectrum Analysis, factor vector, image vectorization.

В системах контекстного поиска изображений по регионам (Region-based image retrieval — RBIR) точность и полнота поиска определяются эффективностью методов выделения регионов на изображении, широкий класс которых основывается на выделении границ регионов на полутоновых изображениях. Однако не все методы преобразования цветных изображений в полутонные сохраняют цветовые контрасты [1], а их потеря сопровождается искажениями контуров, поэтому объекты выделяются на цветных изображениях с использованием текстурно-цветовых методов выделения регионов. Например, в RBIR-системе Blobworld изображение преобразуется в цветовую систему Lab, разработанную Международной комиссией по освещению (Commission internationale de l'éclairage — CIE). Для выделения регионов изображение кластеризуется алгоритмом максимального правдоподобия (Expectation-maximization — EM) в 8-мерном пространстве, образованном цветовыми признаками и пространственными координатами.

тами пикселя на изображении, а также его текстурными признаками: анизотропией, полярностью и контрастом [2].

Основанный на вейвлет-анализе метод поиска сцен, заданных пользователем (WAveLet-based Retrieval of User-specified Scenes — WALRUS), использует двухэтапный алгоритм контекстного описания изображения. На первом этапе изображение обходится маской, и на каждой итерации выполняется вейвлет-преобразование Хаара, из коэффициентов которого формируется вектор признаков данной локальной области. На следующем этапе выполняется выделение регионов на изображении путем кластеризации локальных областей в пространстве признаков. Для описания региона используется вектор признаков, являющийся результатом усреднения локальных векторов признаков областей, которые вошли в состав соответствующего кластера [3].

В основанном на вейвлет-анализе методе индексации изображений по регионам (Wavelet-Based Indexing of Images Using Region Fragmentation — Windsurf) для выделения регионов используется глобальное вейвлет-преобразование Хаара в пространстве, образованном цветовым тоном, насыщенностью и яркостью (Hue Saturation Value — HSV). Определение однородности цветового контекста региона выполняется по результатам сравнения следа ковариационной матрицы изображения, вычисленного по коэффициентам вейвлет-преобразования, с эмпирически подобранным пороговым значением. Для регионов с неоднородным цветовым контекстом выполняется разбиение коэффициентов вейвлет-преобразования на 2...10 кластеров. Наилучшее разбиение определяется по оценочной функции, которая учитывает только крупномасштабные кластеры [4].

Во всех этих методах дескрипторы — многомерные векторы, что существенно усложняет как индексирование, так и поиск изображений по регионам. Таким образом, проблема разработки методов выделения регионов на изображениях со сложным цветовым и пространственным контекстом, которые минимизируют количество признаков в дескрипторе, — актуальна.

Одно из возможных решений этой проблемы заключается в представлении связного региона его замкнутой границей и усредненным значением цвета. Предлагается метод выделения границ на цветных изображениях, инвариантный к цветовому и пространственному контексту регионов, например, наличию текстур на изображении.

Пусть, в общем случае, изображение сканируется квадратной маской со стороной m . Обозначим квадратную матрицу такого же размера, как и маска, через $\mathbf{C}$. Элементы этой матрицы — значения цвета пикселей в пределах маски. Для упрощения предварительного анализа предлагается считать, что граница в пределах маски расположена горизонтально, пиксели верхних k строк имеют значение цвета I_1 , а остальные $m-k$ строк — I_2 . В этом случае матрицу $\mathbf{C}$ можно представить в виде блочной матрицы

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{pmatrix},$$

где $\mathbf{P}$ — прямоугольная матрица размерности $k \times m$, с элементами $p_{ij} = I_1$;

$\mathbf{Q}$ — матрица размерности $(m-k) \times m$ с элементами $q_{ij} = I_2$.

Пусть $I_1 < I_2$. Для упрощения дальнейших вычислений будет использоваться матрица с элементами $\tilde{c}_{ij} = c_{ij} - I_1$

$$\tilde{\mathbf{C}} = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{P}} \\ \tilde{\mathbf{Q}} \end{pmatrix},$$

где $\tilde{\mathbf{P}}$ — нулевая матрица размерности $k \times m$;

$\tilde{\mathbf{Q}}$ — матрица размерности $(m-k) \times m$ с элементами $\tilde{q}_{ij} = I_2 - I_1$.

После векторизации матрицы $\tilde{\mathbf{C}}$ по строкам с разворотами получена матрица-строка

$$\mathbf{F} = (\mathbf{F}_0 \quad \mathbf{F}_c),$$

где $\mathbf{F}_0$ — нулевая матрица-строка размерности $1 \times mk$;

$\mathbf{F}_c$ — матрица-строка размерности $1 \times m(m-k)$ с элементами $f_{ij} = I_2 - I_1$.

С использованием $\mathbf{F}_c$ строится матрица вложения $\mathbf{X}$ [5] размерности $L \times (m^2 - L + 1)$, где L — размер окна, состоящая из блоков, т.е.

$$\mathbf{X} = (\mathbf{X}_N \quad \mathbf{X}_D \quad \mathbf{X}_R),$$

где $\mathbf{X}_N$ — нулевая прямоугольная матрица размерности $L \times (mk - L + 1)$;

$\mathbf{X}_D$ — квадратная матрица размерности $L \times L$ с элементами $x_{ij} = \begin{cases} 0, & (i+j) < (L+1), \\ I_2 - I_1, & (i+j) \geq (L+1); \end{cases}$

$\mathbf{X}_R$ — прямоугольная матрица размерности $L \times (m(m-k) - L)$, все элементы которой равны $x_{ij} = I_2 - I_1$.

Далее вычисляется матрица $\mathbf{S} = \mathbf{X}\mathbf{X}^T$ и ее сингулярные тройки: λ_i — собственные значения матрицы $\mathbf{S}$; $\mathbf{U}_i$ — собственные векторы, соответствующие λ_i ; факторные векторы $\mathbf{V}_i = \mathbf{X}^T \mathbf{U}_i / \sqrt{\lambda_i}$. Не умаляя общности дальнейшего анализа, полагается $L = 3$, а $f_{ij} = 1$. Тогда λ_i — корни кубического уравнения. Для дальнейшего наибольший интерес будет представлять сингулярная тройка, соответствующая наибольшему собственному значению

$$\lambda_1 = -\frac{p}{3} - \frac{\sqrt[3]{2}(3q - p^2)}{3\left(G + \sqrt{G^2 + 4(3q - p^2)^3}\right)^{\frac{1}{3}}} + \frac{1}{3\sqrt[3]{2}} \left(G + \sqrt{G^2 + 4(3q - p^2)^3}\right)^{\frac{1}{3}},$$

где $p = 3m(k-m) + 2L - 3$;

$q = 2m(k-m)(1-L) + L(5-2L) - 4$;

$G = -2p^3 - 27L(L+km-m^2-3) + 54m(k-m) + 9pq - 54$.

При этом собственный вектор $\mathbf{U}_1$, соответствующий λ_1 , будет иметь компоненты

$$u_{1,1} = \frac{4 + L^2 - \lambda_1^2 - 2km + 2m^2 - L(4 + \lambda_1 - km + m^2) + \lambda_1(2 - 2km + 2m^2)}{(L + km - m^2 - 1)\lambda_1};$$

$$u_{1,2} = \frac{(\lambda_1 - L + 2)}{\lambda_1}; \quad u_{1,3} = 1.$$

Факторный вектор, соответствующий λ_1 ,

$$\mathbf{V}_1 = (\mathbf{V}_{11} \quad \mathbf{V}_{12} \quad \mathbf{V}_{13}), \quad (1)$$

где $\mathbf{V}_{11}$ — нулевой вектор-строка размерности $1 \times (mk - L + 1)$;

$\mathbf{V}_{12} = \left(1 \quad 1 + \frac{2-L+\lambda_1}{\lambda_1}\right)$ — вектор-строка размерности $1 \times [L-1]$;

$\mathbf{V}_{13}$ — вектор-строка размерности $1 \times [m(m-k) - L + 1]$ с элементами $v_{13,i} = \frac{L(\lambda_1 - 1) - \lambda_1^2 + 2}{\lambda_1(L + km - m^2 - 1)}$,

$1 \leq i \leq [m(m-k) - L + 1]$.

Если сравнить размерности $\mathbf{V}_{11}$ и $\mathbf{X}_N$, то можно заметить, что количество нулей в $\mathbf{V}_{11}$ совпадает с количеством нулевых столбцов матрицы $\mathbf{X}_N$, и, следовательно, анализируя фак-

торный вектор V_1 (1), можно установить строку маски, в которой изменяется цвет, или, что тоже самое, строку с границей регионов.

Пусть Δ — количество нулевых компонент факторного вектора V_1 , тогда в маске номер строки, содержащей границу,

$$g = \frac{\Delta + L - 1}{m} + 1. \quad (2)$$

Таким образом, горизонтальную границу между цветовыми регионами в пределах маски можно определить без использования градиентной фильтрации полутоновых изображений. Очевидно, что для определения положения вертикальной границы между двумя цветовыми регионами необходимо транспонировать матрицу C .

Если же граница между двумя цветовыми регионами ориентирована, например, параллельно побочной диагонали, то матрица $\tilde{C}$ имеет k нулевых диагоналей и ее следует векторизовать с использованием схемы “Зигзаг” [6]. Тогда получим матрицу-строку вида

$$F_D = (F_{D0} \quad F_{DC}),$$

где F_{D0} — нулевая матрица-строка размерности $1 \times r$;

F_{DC} — матрица-строка размерности $1 \times s$ с элементами равными $f_{ij} = I_2 - I_1$.

Если $k \leq m$, то $r = \sum_{t=1}^k t$, иначе $r = \sum_{t=1}^m t + \sum_{t=m+1}^k (2m - t)$, а $s = m^2 - r$.

Для окна размером L матрица вложения X_d является блочной, т.е.

$$X_d = (X_{dN} \quad X_{dD} \quad X_{dR}),$$

где X_{dN} — нулевая прямоугольная матрица размерности $L \times (r - L + 1)$;

X_{dD} — квадратная матрица размерности $L \times L$, с элементами $x_{ij} = \begin{cases} 0, & (i + j) < (L + 1), \\ I_2 - I_1, & (i + j) \geq (L + 1); \end{cases}$

X_{dR} — прямоугольная матрица размерности $L \times (s - L)$, все элементы которой равны $x_{ij} = I_2 - I_1$.

Для данного случая вычисление собственных и факторных векторов, в общем виде, очень громоздко, поэтому рассмотрены числовые примеры для $m = 5$ и $L = 3$ при $k = 4 \dots 7$.

Для $k = 7$ матрица вложения X_d состоит из двух блоков: X_{dN} размерности 3×20 и X_{dD} размерности 3×3 . Тогда матрица

$$S = XX^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}.$$

Далее исследуются сингулярная тройка, соответствующая максимальному собственному значению данной матрицы $\lambda_1 = 5,05$. Компоненты собственного вектора U_1 этой матрицы, соответствующего λ_1 , $u_{1,1} = 0,45$, $u_{1,2} = 0,8$, $u_{1,3} = 1$. Определяются значения компонент $v_{1,i}$ факторного вектора V_1 (1), соответствующего λ_1 (рис. 1).

При диагональной границе количество нулевых компонент Δ вектора V_1 нелинейно зависит от k

$$\Delta = -0,5k^2 + 9,5k - 22.$$

Отсюда, номер диагонали, которая расположена на границе двух цветовых регионов,

$$g_D = 9,5 - \sqrt{90,25 - 2(22 + \Delta(k))} . \quad (3)$$

На основании выполненного анализа разработано соответствующее программное обеспечение для анализа факторных векторов, в котором компоненты $v_{1,i}$ округлены до ближайшего целого. Для экспериментального исследования использовались фрагменты фотореалистичных изображений с масками со сторонами $m \in \{5, 15, 30\}$. На рис. 2 приведены увеличенные исходный фрагмент изображения, выделенный маской со стороной $m = 15$, и его первая сингулярная компонента $\mathbf{X}_1 = \sqrt{\lambda_1} \mathbf{U}_1 \mathbf{V}_1^T$ для окна размером $L = 3$. Граница, с которой начинается часть маски темного цвета, расположена в седьмой строке, т.е. $g = 7$.

Рис. 1. Компоненты $v_{1,i}$ факторного вектора $\mathbf{V}_1$ (1), соответствующего $\lambda_1 = 5,05$

Рис. 2. Фрагмент изображения, выделенный маской со стороной $m=15$ (а) и первая сингулярная компонента $\mathbf{X}_1$ для окна размером $L=3$ (б)

Определены значения компонент $v_{1,i}$ факторного вектора $\mathbf{V}_1$ (1) (рис. 3). В этом случае количество нулевых компонент $\Delta = 88$ и в соответствии с формулой (1) $g = 7$.

Метод также тестировался на изображениях со сложным цветовым и пространственным контекстом — текстурах. Например, с помощью окна размером $L=15$ получена первая сингулярная компонента $\mathbf{X}_1$ изображения маски со стороной $m = 30$, содержащей текстурные фрагменты (рис. 4). Для данного изображения $\Delta = 651$, что соответствует $g = 23$.

Рис. 3. Значения компонент $v_{1,i}$ факторного вектора $\mathbf{V}_1$

Рис. 4. Изображение с текстурой для маски со стороной $m=30$ (а) и его первая сингулярная компонента $\mathbf{X}_1$ (б)

Определены значения компонент $v_{1,i}$ факторного вектора $\mathbf{V}_1$ для маски со стороной $m = 5$ и границей, ориентированной параллельно побочной диагонали (рис. 5), откуда следует, что $\Delta = 20$, количество нулевых диагоналей $g_D = 7$.

Таким образом, предложен метод выделения границ на цветных изображениях, инвариантный к цветовому и пространственному контексту регионов. Данный метод позволяет эффективно выделять границы между текстурными регионами и границы между регионами с плавным градиентным изменением цвета. Решение о наличии границы выносится на основании анализа структуры факторного вектора $\mathbf{V}_1$ (1), соответствующего максимальному собственному значению λ_1 . Получена аналитиче-

Рис. 5. Значения компонент $v_{1,i}$ факторного вектора $\mathbf{V}_1$ для маски со стороной $m=5$

ская зависимость для определения номера строки, столбца g (2) или диагонали g_D (3), содержащих границу на изображении маски. Метод может быть эффективно использован для выделения регионов изображений в системах контекстного поиска изображений по регионам (RBIR).

Литература

1. Cadík, M. Perceptual Evaluation of Color-to-Grayscale Image Conversions / M. Cadík // Pacific Graphics. — 2008. — Vol. 27. — С. 128 — 138.
2. Blobworld: A system for region-based image indexing and retrieval / C. Carson, M. Thomas, S. Belongie and others // Visual Inform. and Inform. Systems. Lecture Notes in Computer Science. — 1999. — Vol. 1614. — С. 509—517.
3. Natsev, A. WALRUS: A similarity retrieval algorithm for image databases / A. Natsev, R. Rastogi, K. Shim // Newsletter ACM SIGMOD Record. — 1999. — Vol. 28, № 2. — P. 395 — 406.
4. Bartolini, I. The Windsurf Library for the Efficient Retrieval of Multimedia Hierarchical Data / I. Bartolini, M. Patella, G. Stromei // Proc. of the Intern. Conf. on Signal Processing and Multimedia Applications. — 2011. — № 1. — С. 139 — 148.
5. Golyandina, N. Analysis of Time Series Structure: SSA and Related Techniques/ N. Golyandina, V. Nekrutkin, A. Zhigljavsky. — London: Chapman & Hall, 2001. — 305 p.
6. ISO/IEC 10918-1:1994 Information technology. Digital compression and coding of continuous-tone still images: Requirements and guidelines. — 186 p.

References

1. Cadík, M. Perceptual Evaluation of Color-to-Grayscale Image Conversions / M. Cadík // Pacific Graphics. — 2008. — Vol. 27. — pp. 128 — 138 [in English].
2. Blobworld: A system for region-based image indexing and retrieval / C. Carson, M. Thomas, S. Belongie and others // Visual Inform. and Inform. Systems. Lecture Notes in Computer Science. — 1999. — Vol. 1614. — pp. 509 — 517 [in English].
3. Natsev, A. WALRUS: A similarity retrieval algorithm for image databases / A. Natsev, R. Rastogi, K. Shim // Newsletter ACM SIGMOD Record, 1999. — Vol. 28, № 2. — pp. 395 — 406 [in English].
4. Bartolini, I. The Windsurf Library for the Efficient Retrieval of Multimedia Hierarchical Data / I. Bartolini, M. Patella, G. Stromei // Proc. of the Intern. Conf. on Signal Processing and Multimedia Applications. — 2011. — № 1. — pp. 139 — 148 [in English].
5. Golyandina, N. Analysis of Time Series Structure: SSA and Related Techniques. London: Chapman & Hall / N. Golyandina, V. Nekrutkin, A. Zhigljavsky // CRC, 2001. — 305 p [in English].
6. ISO/IEC 10918-1:1994 Information technology — Digital compression and coding of continuous-tone still images: Requirements and guidelines. — ISO/IEC, 1994. — 186 p [in English].

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. акад. связи Василю Е.В.

Поступила в редакцию 10 сентября 2013 г.