

УДК 004.942+004.93'1

К.С. Смеляков

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРИТЕРИЕВ КОНТРАСТИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для обеспечения устойчивости сегментации (построения) границ изображений по контрастности в работе производится сравнительный анализ эффективности основных критериев, используемых в настоящее время для контрастирования изображений с использованием масок, в отношении обеспечения важнейшего свойства отделимости пикселей внутреннейности областей от пикселей границы по контрастности.

**Ключевые слова:** критерий, контрастность, маска, свертка, градиент, лапласиан.

### Постановка проблемы

Свойство контрастности изображений является не менее важным, чем свойство яркости, поскольку при незначительных вариациях яркости уровни контрастности неизменны. Поэтому методы сегментации по контрастности в настоящее время рассматриваются в качестве основных методов сегментации изображений [1, 2]. При этом для сегментации областей в качестве основного применяется метод водоразделов, а для сегментации границ – контурные методы сегментации [3 – 5].

Методы сегментации изображений (границ изображений) по контрастности основаны на использовании порогового детектора, применяемого для идентификации неконтрастных (контрастных) пикселей внутреннейности (границы) изображения, с последующим применением специальных методов, например, волнового метода, для получения связанных областей (границ) [6, 7]. Используемый при этом пороговый детектор имеет вид:

$$g(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{if } (g(i, j) < T), \\ 0, & \text{else,} \end{cases} \left( \begin{cases} 1, & \text{if } (g(i, j) \geq T), \\ 0, & \text{else,} \end{cases} \right) \quad (1)$$

где  $g(i, j)$  – мера контрастности пикселя  $d(i, j)$ , а  $T$  – заданная пороговая величина, которая используется для классификации пикселей изображения на неконтрастные пиксели внутреннейности и контрастные пиксели границы. Таким образом, качество пороговой сегментации изображений в первую очередь зависит от правила, выбранного для оценивания контрастности пикселей изображения.

Поэтому для обеспечения устойчивости сегментации (построения) границ изображений по контрастности актуальной является задача сравнительного анализа эффективности критериев контрастирования изображений, в отношении обеспечения отделимости пикселей внутреннейности областей от пикселей границы по контрастности.

### 1. Свертка по маске

Наиболее распространенные правила оценки контрастности  $g(i, j)$  основаны на использовании

свертки, определяемой сумой произведений яркостей  $f(i + \xi, j + \eta)$  пикселей лежащих в окрестности рассматриваемого пикселя  $(i, j)$  на соответствующие им весовые коэффициенты  $a(n + \xi, m + \eta)$ ,  $\sum a(n + \xi, m + \eta) = 0$ , определяемые маской свертки:

$$g(i, j) = \frac{1}{K} \cdot \left| \sum_{\xi=-n}^n \sum_{\eta=-m}^m a(n + \xi, m + \eta) \cdot f(i + \xi, j + \eta) \right|, \quad (2)$$

где в качестве нормировочного коэффициента  $K$  берут, как правило, число не нулевых весовых коэффициентов  $a(n + \xi, m + \eta)$ . При этом на практике нормировочный коэффициент часто не используется для того, чтобы работать с оценками контрастности (2) как с целыми числами [1, 4].

Маска свертки по умолчанию является симметричной, поэтому суммирование производится в симметричном диапазоне  $[-n, n]$ ,  $[-m, m]$  (рис. 1).

0	-1	0	-1	-1	-1	0	0	-1	0	0
-1	4	-1	-1	8	-1	-1	-2	16	-2	-1
0	-1	0	-1	-1	-1	0	-1	-2	-1	0
	а			б				в		

Рис. 1. Лапласиан по 4- (а) и 8-связности (б), лапласиан гауссиана (в) [1, 2]

Так, например, при использовании 8-связного лапласиана (рис. 1,б) мы получим свертку вида (2):

$$g(i, j) = \frac{1}{9} \cdot \left| \sum_{\xi=-1}^1 \sum_{\eta=-1}^1 a(1 + \xi, 1 + \eta) \cdot f(i + \xi, j + \eta) \right|.$$

При совмещении центра маски размера  $3 \times 3$  (рис. 1, а, б) с пикселем границы объекта, мы будем оценивать контрастность граничного пикселя объекта без учета пикселей фона, но с учетом пикселей тени, которая образуется при оцифровке множеством пикселей, расположенных на границе раздела

объекта и фона, яркость которых принимает промежуточное значение между яркостями объекта и фона (рис. 2). При совмещении центра маски размера  $5 \times 5$  (рис. 1, в) с пикселем границы объекта, мы будем оценивать контрастность граничного пикселя объекта с учетом пикселей объекта, тени и фона.

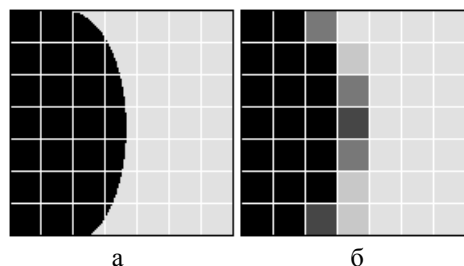


Рис. 2. Оптическое (а) и цифровое (б) изображение объекта с тенью [7]

Наличие тени изображения, является одним из важнейших факторов снижения контрастности границ изображений при использовании масок (рис. 1), ограничивающим возможность однозначной классификации пикселей границы, поскольку пиксели тени способствуют сглаживанию переходов яркости между объектом и фоном.

Таким образом, оценка контрастности пикселя границы с использованием свертки по маске не будет давать нам адекватного перепада яркости между объектом и фоном, а будет давать некую интегральную оценку перепада яркости с учетом яркостей пикселей объекта, тени и, возможно, фона. При этом для границ различной кривизны мы будем получать различные значения контрастности, которые, при этом будут дополнительно сглаживаться за счет частичной взаимной компенсации произведений  $a(n + \xi, m + \eta) \cdot f(i + \xi, j + \eta)$  различных знаков.

В результате свертку (2) на практике мы сможем использовать лишь для высококонтрастных изображений, поскольку при снижении контрастности объектов относительно фона мы получим пересечение уровней контрастности для внутренности объекта  $p(g)$ , и его границы  $h(g)$  (рис. 3) в диапазоне  $[h^*, P^*]$ , который будет возрастать со снижением общего уровня контрастности объекта.

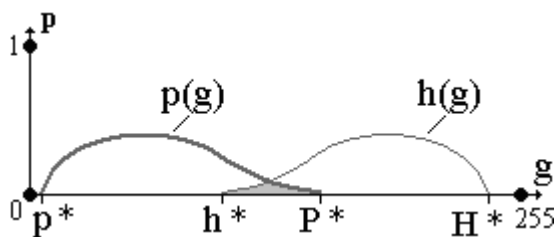


Рис. 3. Типовые плотности распределения контрастности для внутренности и границы объекта при использовании свертки по маске вида (2) [7]

В результате мы не сможем выбрать порог  $T$  для однозначной сегментации пикселей внутренности (границы) объекта по контрастности. Выбор компромиссного порога в диапазоне  $[h^*, P^*]$  в любом случае будет характеризоваться определенными уровнями частичной и ложной сегментации.

Взаимная компенсация произведений различных знаков  $a(n + \xi, m + \eta) \cdot f(i + \xi, j + \eta)$  может быть устранена при использовании свертки вида:

$$g(i, j) = \frac{||S1| - |S2||}{K}, \quad (3)$$

где  $S1, S2$  – суммы положительных и отрицательных произведений  $a(n + \xi, m + \eta) \cdot f(i + \xi, j + \eta)$ .

Недостатком свертки (3) является тот факт, что максимальные значения контрастности будут получены для пикселей тени, а не границы объекта.

## 2. Свертка по направленной маске

Для оценивания контрастности пикселей в настоящее время также применяются направленные маски (рис. 4).

-1	-1	-1	-1	0	1
0	0	0	-1	0	1
1	1	1	-1	0	1

а

-1	-2	-1	-1	0	1
0	0	0	-2	0	2
1	2	1	-1	0	1

б

Рис. 4. Направленные маски Превитта (а), Собела (б)

Суть использования таких масок для оценивания контрастности состоит в том, чтобы после совмещения центра маски с некоторым пикселем изображения оценивать контрастность для каждого  $\xi$ -го положения маски вращения (рис. 5) с использованием свертки.

-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0	1	0	1	1
0	0	0	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
1	1	1	0	1	1	-1	0	1	-1	-1	0

Рис. 5. Вращение маски Превитта

Затем в качестве оценки контрастности выбирается наибольшая из оценок:

$$g(i, j) = g^* = \max_{\xi} \{g(\xi)\}. \quad (4)$$

Основной недостаток при использовании направленных масок состоит в том, что оценка контрастности пикселей границы получается относительно тени, а не фона. Кроме того, максимальные значения контрастности будут получены для пикселей тени, а не для пикселей границы объекта.

Достоинством при использовании направленных масок является возможность оценивания направления прохождения границы по оси  $0-0-0$  положения маски с номером  $\xi^*$  контрастного пик-

селя. Эта информация может быть очень ценной для методов построения границ изображений.

### 3. Норма градиента

Для оценивания контраста используют дискретную аппроксимацию значения градиента в окрестности рассматриваемого пикселя вида:

$$\begin{cases} |\nabla f| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}; \\ \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{k} \cdot [M_x \circ N[x, y]]; \\ \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{1}{k} \cdot [M_y \circ N[x, y]], \end{cases} \quad (5)$$

где  $M_x \circ N[x, y]$ ,  $M_y \circ N[x, y]$  – скалярное произведение маски весовых коэффициентов  $M$  на матрицу яркостей пикселей окрестности  $N$ .

При этом для оценки направления градиента используется следующее соотношение [3]:

$$\varphi = \text{arctg} \left( \frac{\partial f / \partial y}{\partial f / \partial x} \right).$$

Для оценивания градиента функции в настоящее время применяется довольно широкий спектр функций, основанный на использовании масок Робертса, Собеля, Превитта и ряда иных. Так, например, при использовании масок Превитта (рис. 4.а) оценка градиента (5) примет вид [3]:

$$\begin{cases} |\nabla f| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}; \\ \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{6} \cdot [M_x \circ N[x, y]]; \\ \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{1}{6} \cdot [M_y \circ N[x, y]]; \end{cases}$$

$$M_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}; M_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Использование рассмотренной оценки градиента характеризуется теми же недостатками и достоинствами, что и использование направленных масок; кроме того, оценка (5) производится с привязкой к направлениям по осям. Для устранения этого недостатка мы можем пойти двумя путями.

Во-первых, мы можем использовать технологию вращения пары масок  $M$  (рис. 5) с оценкой градиента по критерию максимума, типа (4).

Во-вторых, для распределения яркости в рассматриваемой окрестности (в предположении линейного характера этого распределения), мы можем оценить коэффициенты линейной регрессии вида:

$$p(x, y) = a + b \cdot x + c \cdot y, \quad (6)$$

и в качестве оценки контрастности центрального

пикселя окрестности рассматривать норму градиента вида:

$$N = \|\nabla p\| = \sqrt{b^2 + c^2}; \quad b = \frac{\partial p}{\partial x}; \quad c = \frac{\partial p}{\partial y}. \quad (7)$$

### 4. Модифицированный градиент

В [7] для оценивания контраста предложена следующая численная аппроксимация нормы градиента вида:

$$g(i, j) = \max_{(\xi, \eta)} |f(i, j) - f(\xi, \eta)|, \quad (8)$$

где  $f(i, j)$  – яркость оцениваемого пикселя, совмещенного с центром маски, а  $f(\xi, \eta)$  – яркости пикселей окрестности, определяемые положением маски. В отличие от классического подхода маска при этом определяется не в виде матрицы весовых коэффициентов (рис. 1), а геометрически (рис. 6).

На базовом уровне маска определяется в виде образа окружности (рис. 6, а), а составная маска – в виде образа окружности дополненного следом окружности до 8-связной линии [7] (рис. 6, в).

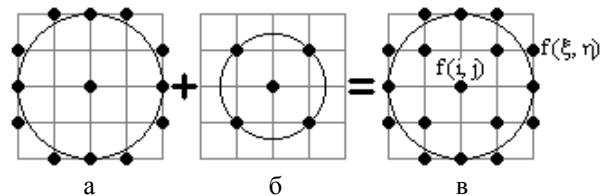


Рис. 6. Образ окружности радиуса 2 (а), след окружности радиуса  $\sqrt{2}$  (б), и построенная их объединением составная маска радиуса 2 (в)

За счет преодоления тени изображения (с применением маски предложенного типа не минимального радиуса) и использования оценки (8), при совмещении центра маски с пикселем границы изображения теперь мы можем оценивать его контрастность относительно пикселя фона, а не тени изображения; базовой в этом отношении считается маска радиуса 2 (рис. 6, а).

Кроме того, для нас теперь не важна степень кривизны границы. Важно лишь, чтобы при совмещении центра маски с пикселем границы изображения, среди пикселей, определяемых положением маски, был хотя бы один пиксель фона.

С целью использования маски для дифференциальной обработки изображений по направлениям, параметризуем пиксели маски полярным углом  $\alpha$ , с использованием параметрического представления окружности радиуса  $\rho$  с центром в пикселе  $(i, j)$ :

$$\begin{cases} x = i + \rho \cdot \cos(2\pi\tau), \\ y = j + \rho \cdot \sin(2\pi\tau), \end{cases} \quad \tau \in [0, 1],$$

и представим полученные результаты – направления  $\{\alpha_\zeta\}_\zeta$  на пиксели  $\{d_\zeta\}_\zeta$  маски матрицей-строкой направлений  $A$  [7].

Важным достоинством предложенного подхода к оцениванию контрастности является возможность построения спектра  $G$  контрастностей  $g_{\zeta} = f(i, j) - f(\xi, \eta)_{\zeta}$  пикселя  $(i, j)$ , который в паре с матрицей направлений  $A$  является очень информативной структурой, используемой для классификации сегментируемых контрастных пикселей, а также для использования направлений при построении границ изображений [7].

### 5. Системные аспекты контрастирования изображений

Какое бы правило оценивания контрастности мы не использовали, важнейшими являются два обстоятельства.

1). Предварительно построению поля распределения контрастности может быть необходимым исключение экстремальных наблюдений вызванных шумами, или иными факторами, поскольку такие экстремальные наблюдения, особенно импульсные шумы, приводят к неадекватности оценивания контрастности в смысле ее завышения для всей окрестности пикселя с экстремальной яркостью [1, 2].

2). Правило оценивания контрастности должно выбираться из условия минимизации сглаживания границы с тем, чтобы для пикселей внутренности объектов давать низкие оценки, а для пикселей границы – высокие, с целью адекватного разделения этих оценок и, следовательно, адекватной сегментации внутренности и границы изображения. Фактически речь идет о необходимости максимизации разности  $mg = h^* - P^*$  (рис. 3). Если мы сможем получить положительный разнос  $mg = h^* - P^*$ , в такой ситуации мы сможем выбрать порог (1) для сегментации пикселей внутренности и границы изображения так [7]:

$$T = (P^* + h^*) / 2,$$

общая в максимум запас прочности порогового дельтатора (1) вида:

$$\min\{(T - P^*), (h^* - T)\},$$

### ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ КРИТЕРІЇВ КОНТРАСТУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

К.С. Смеляков

Для забезпечення стійкості сегментації зображень по контрастності в роботі проводиться порівняльний аналіз ефективності основних критеріїв, які використовуються в теперішній час для контрастування зображень з використанням масок, відносно забезпечення властивості віддільності пікселів внутрішності областей від пікселів границі по контрастності.

**Ключові слова:** критерій, контрастність, маска, згортка, градієнт, лапласіан.

### COMPARISON OF EFFICIENCY OF IMAGE CONTRASTING CRITERIA

K.S. Smelyakov

In order to provide stability of image segmentation by contrast, for the basic image contrasting masks criteria a comparative analysis of efficiency is carried out relative to contrast discrimination between the bound and internal area pixels.

**Keywords:** criterion, contrasting, mask, package, gradient, Laplacian.

и, следовательно, устойчивость пороговой сегментации за счет равного удаления порога  $T$  от границ интервала  $[P^*, h^*]$ .

### Выводы

Для обеспечения устойчивости сегментации изображений по контрастности в работе проведен сравнительный анализ эффективности основных критериев, используемых в настоящее время для контрастирования изображений с использованием масок, в отношении обеспечения важнейшего свойства – делимости пикселей внутренности областей от пикселей границы по контрастности. В результате показано, наилучшей является дифференциальная оценка контрастности величиной градиента вида (8), поскольку при совмещении центра маски с пикселем границы изображения его контрастность оценивается относительно пикселя фона, а не пикселя тени изображения. Кроме того, на оценку контрастности не влияет степень кривизны границы.

### Список литературы

1. Gonzalez R. Woods Digital Image Processing. Second Edition / R. Gonzalez . – Prentice Hall, 2002. – 793 p.
2. Sonka M. Image processing, analysis, and machine vision / M. Sonka, V. Hlavak, R. Boyle. – California (USA): Cole Publishing Company, 1999. – 770 p.
3. Шапиро Л. Компьютерное зрение: пер. с англ. / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: БИНОМ, 2006. – 752 с.
4. Семенов С.И. Теория неадаптивных масок для обработки изображений / С.И. Семенов // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2002. – № 12. – С. 33-40.
5. Форсайт Д. Компьютерное зрение. Современный подход: пер. с англ. / Д. Форсайт, Ж. Понс. – М.: Вильямс, 2004. – 928 с.
6. Яне Б. Цифровая обработка изображений / Б. Яне. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
7. Смеляков К.С. Модели и методы сегментации границ изображений нерегулярного вида на основе адаптивных масок: дис. ... канд. техн. наук: 09.03.05 / Смеляков Кирилл Сергеевич. – Х., 2005. – 162с.

Поступила в редколлегию 22.12.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.В. Рубан, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.