

А.А. Насонова, А.С. Крылов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИН ГРАНИЦ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕРЕЗКОГО МАСКИРОВАНИЯ*

1. Введение

Оценка уровня размытия сигнала играет важную роль в таких задачах, как восстановление размытого фона изображений и видео, систем автоматической фокусировки, конвертирования 2D изображений в 3D и др. [1].

Размытие обычно моделируется как свертка исходного изображения с гауссовой функцией. При этом задача оценки размытия сводится к нахождению дисперсии Гауссова ядра размытия. Для решения этой задачи были предложены разные подходы [2,3,4].

В работах [2,3] размытый сигнал сворачивается с фильтром, являющимся второй производной гауссовой функции. Результат свертки обладает положительным и отрицательным пиками, расстояние между которыми используется для определения радиуса размытия. Однако данный метод работает нестабильно для нескольких близкорасположенных границ.

В работе [4] исходное изображение размывается с несколькими различными Гауссовыми ядрами. Далее разностные отношения между полученными размытыми изображениями и исходным изображением используются для определения неизвестного радиуса размытия.

В данной работе предложен новый метод оценки ширины границы изображения, который использует подход нерезкого маскирования. Предложена модель границы изображения, для которой приводится полное решение задачи нахождения ширины границы. Приведены примеры применения данного метода для оценки уровня размытия реальных изображений.

2. Модель одномерного профиля границы изображения в заданной точке

В качестве входной информации для анализа профилей используются границы, полученные одним из методов детектирования границ изображений [5,6]. Для каждой из выделенных границ профиль в

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, научный проект № 13-07-00438.

каждой из точек берется как функция интенсивности изображения по прямой, нормальной к выделенной границе.

Моделирование профиля выделенной границы изображения предлагается проводить следующим образом: профиль границы изображения общего вида представляется как результат свертки идеальной ступенчатой функции единичной высоты и Гауссова ядра с некоторой дисперсией σ .

Подобное предположение позволяет выявить взаимно однозначное соответствие между профилем границы изображения и числовым значением — дисперсией Гауссова ядра. Это числовое значение в рамках данной модели считается шириной профиля границы изображения.

Рассмотрим данную модель более подробно. Пусть $H(x)$ является идеальной ступенчатой функцией единичной высоты:

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

Стоит заметить, что

$$H(kx) = H(x) \quad \forall k > 0.$$

Пусть $E_\sigma(x)$ является профилем границы изображения (см. Рис.1). Профиль на основе предлагаемой модели записывается как:

$$E_\sigma(x) = [H * G_\sigma](x) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} H(t) \cdot G_\sigma(x-t) dt, \quad (1)$$

где * обозначает операцию свертки.

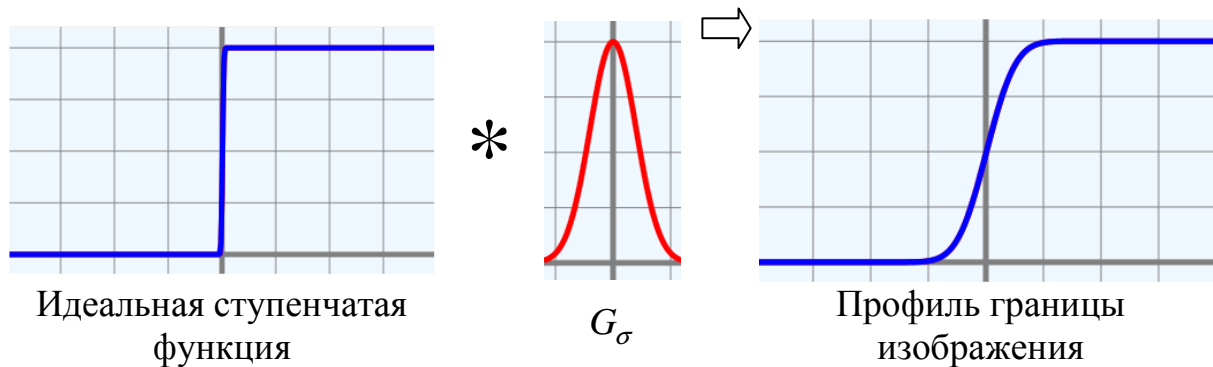


Рис.1. Модель профиля границы изображения

Можно показать, что имеет место следующее

Утверждение 1. $\forall \sigma > 0, \sigma' > 0$ функция $E_\sigma(x)$ обладает следующим свойством:

$$E_\sigma(x) = E_{\sigma'}\left(\frac{\sigma'}{\sigma} x\right). \quad (2)$$

3. Оценка ширины профиля границы изображения

Для оценки ширины профиля границы изображения предлагается использовать подход, основанный на нерезком маскировании.

Метод нерезкого маскирования, направленный на повышение резкости изображения, получил свое название еще в докомпьютерную эпоху при обработке фото. Брался негатив и копировался через стекло на негативную пленку, при этом получался нерезкий позитив. Далее все это совмещалось и экспонировалось на контрастную фотобумагу. Наибольшая разница в контурах была в особо контрастных местах, и таким образом она еще усиливалась.

Для изображения I нерезкое маскирование определяется как

$$U_{\sigma, \alpha}[I] = (1 + \alpha)I - \alpha I * G_{\sigma}, \quad (3)$$

где σ и α — параметры метода.

Пусть $U_{\sigma, \alpha}[E_{\sigma_0}](x)$ является результатом нерезкого маскирования с параметрами σ и α , примененной к профилю границы изображения $E_{\sigma_0}(t)$.

Выражение (3) может быть переписано как

$$\begin{aligned} U_{\sigma, \alpha}[E_{\sigma_0}](x) &= (1 + \alpha)E_{\sigma_0}(x) - \alpha[E_{\sigma_0} * G_{\sigma}](x) = \\ &= (1 + \alpha)E_{\sigma_0}(x) - \alpha[H * G_{\sigma_0} * G_{\sigma}](x) = \{\text{свойства Гауссова ядра}\} = \\ &= (1 + \alpha)E_{\sigma_0}(x) - \alpha[H * G_{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma^2}}](x) = (1 + \alpha)E_{\sigma_0}(x) - \alpha E_{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma^2}}(x). \end{aligned} \quad (4)$$

Пусть нерезкое маскирование производится с тем же значением параметра σ , с которым произошло размытие профиля границы изображения, тогда из (4) при использовании (2) следует

Утверждение 2. $\forall \sigma_1 > 0, \sigma_2 > 0$

$$U_{\sigma_1, \alpha}[E_{\sigma_1}](x) = U_{\sigma_2, \alpha}[E_{\sigma_2}]\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}x\right). \quad (5)$$

Таким образом, из (5) следует, что при фиксированном значении параметра α для всех значений параметра $\sigma > 0$ происходит растяжение/сжатие функции $U_{\sigma, \alpha}[E_{\sigma}](x)$ по оси $0x$. В частности, это означает, что при фиксированном значении параметра α для всех значений параметра $\sigma > 0$ значения максимума и минимума функции $U_{\sigma, \alpha}[E_{\sigma}](x)$ остаются неизменными.

Таким образом, для фиксированного значения параметра α и произвольного значения параметра $\sigma = \sigma_E > 0$ возможно вычислить значение $U_E = \max_x U_{\sigma_E, \alpha}[E_{\sigma_E}](x)$ для семейства функций $U_{\sigma, \alpha}[E_{\sigma}](x)$.

Имеют место также

Утверждение 3. Пусть $\sigma_2 > \sigma_1, x > 0$, тогда

$$U_{\sigma_2, \alpha}[E_{\sigma_0}](x) > U_{\sigma_1, \alpha}[E_{\sigma_0}](x),$$

и

Следствие:

$$\begin{aligned} \max_x U_{\sigma, \alpha}[E_{\sigma_0}(t)](x) &\leq U_E, \quad \sigma < \sigma_0, \\ \max_x U_{\sigma, \alpha}[E_{\sigma_0}(t)](x) &\geq U_E, \quad \sigma > \sigma_0. \end{aligned} \quad (6)$$

4. Алгоритм оценки ширины профиля границы изображения

Свойство (6) ведет к следующему алгоритму для оценки ширины профиля границы изображения:

1. Дано: $\alpha, U_E, E_{\sigma_0}(x)$.

2. Для σ от σ_{\min} до σ_{\max} с шагом σ_{step}

 вычислить $U_{\sigma, \alpha}[E_{\sigma_0}](x)$,

 найти локальный максимум x_{\max_σ} для $U_{\sigma, \alpha}[E_{\sigma_0}](x)$,

 если $U_{\sigma, \alpha}[E_{\sigma_0}](x_{\max_\sigma}) \geq U_E$

 result = σ ,

 остановиться.

3. Результат: result.

В данной работе использованы значения $\alpha = 4, U_E = 1.24, \sigma_{\min} = 0.5, \sigma_{\max} = 10, \sigma_{step} = 0.1$.

Для модельного профиля границы (1) с известной шириной σ_0 в интервале от $\sigma_{\min} = 0.5$ до $\sigma_{\max} = 10$ алгоритм давал результаты с отклонением не больше $\sigma_{step} = 0.1$ при наличии информации о профиле на интервале, содержащем сегмент $[-3\sqrt{2}\sigma_0, 3\sqrt{2}\sigma_0]$ (учитывается получающаяся область локализации Гауссиана при нерезком маскировании).

Таким образом, при длине отрезка не менее $6\sqrt{2}\sigma_0$ удается с точностью до σ_{step} определять ширину размытого профиля. В то же время при отсутствии информации о форме профиля на таком отрезке точность оценки существенно падает. Анализ точности определения ширины профиля для различных длин отрезков задания информации о профиле приведен в Таблице 1.

5. Оценка ширины профиля границы изображения при наличии шума

Пусть на изображении присутствует некоторый аддитивный шум $N(x)$. Тогда модель профиля границы изображения (1) преобразуется к виду

$$\overline{E}_\sigma(x) = E_\sigma(x) + N(x),$$

где $N(x)$ — аддитивный шум.

Таблица 1. Анализ точности определения ширины профиля для различных длин отрезков задания информации о профиле, $\sigma_{step} = 0.1$.

Длина отрезка \ σ_0	1	2	5	10	15	30	50
$6\sqrt{2}\sigma_0$	1	2.1	5	10	15	30	50
$6\sigma_0$	1	2.1	5	10	15	30	50
$4\sigma_0$	0.9	1.9	4.8	9.6	14.4	28.8	48
$3.5\sigma_0$	0.9	1.9	4.5	9.1	13.7	27.2	45.2
$3\sigma_0$	0.9	1.6	4.2	8.1	12.4	24.5	41
$2\sigma_0$	1.3	1.8	4	7.9	11.7	23.4	38.9

Во избежание влияния шума на результаты определения ширины профиля границы изображения, предлагается использовать предварительное Гауссово размытие с дисперсией σ_{pb} . Дисперсия σ_{pb} подбирается таким образом, чтобы Гауссова фильтрация максимально подавила шум (см. Рис.2).

Для размытого профиля границы изображения $\overline{E}_{\sigma_0} * G_{\sigma_{pb}}$ определяется его ширина $\overline{\sigma}_0$ при помощи алгоритма, описанного в предыдущем разделе. Далее истинная ширина профиля границы \overline{E}_{σ_0} σ_0 вычисляется как $\sigma_0 = \sqrt{\overline{\sigma}_0^2 - \sigma_{pb}^2}$ в силу свойств Гауссовых функций.

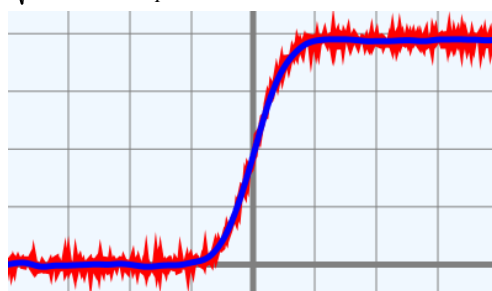


Рис.2. Предварительное гауссово размытие зашумленного модельного профиля

Было рассмотрено два способа выбора параметра σ_{pb} .

а. В первом случае дисперсия предварительного размытия σ_{pb} выбирается следующим образом:

1. подсчитывается максимум абсолютного отклонения сигнала на первой 1/8-ой части сигнала. Это значение считается уровнем шума n .

2. дисперсия предварительного размытия σ_{pb} полагается $n \cdot 200$.

б. Во втором случае дисперсия предварительного размытия σ_{pb} выбирается независимо от уровня шума на изображении. В силу ограниченности интервала, на котором задана функция профиля границы изображения, дисперсия предварительного размытия σ_{pb} выбирается максимально возможной для данного интервала длиной l .

Для возможности корректной работы алгоритма из предыдущего раздела, подразумевающего еще большее размытие профиля границы изображения, дисперсия предварительного размытия σ_{pb} берется равной $l/12\sqrt{2}$.

Таблица 2. Анализ точности определения ширины зашумленного профиля для различного уровня аддитивного однородного шума, $\sigma_{step} = 0.1$, $l = \sigma_0 \cdot 10$. "-" означает, что найденное значение $\sigma_0 < \sigma_{pb}$.

$n \backslash \sigma_0$	1		2		5		10		30		50	
	a.	b.	a.	b.	a.	b.	a.	b.	a.	b.	a.	b.
1	1.0	1.0	2.0	2.0	5.0	5.1	10.0	10.0	29.9	30.1	48.4	50.2
2	1.1	1.0	2.1	2.0	5.2	5.1	9.7	10.0	30.0	30.0	48.6	49.7
5	1.0	0.9	1.9	1.9	6.0	5.0	9.3	9.3	30.3	30.3	49.6	50.0
10	0.6	0.7	2.2	2.0	5.7	4.6	9.6	9.3	30.0	30.0	49.1	49.3
30	0.6	0.5	1.2	1.1	-	4.8	7.7	10.9	29.6	18.8	-	41.5
50	0.5	-	-	-	-	1.0	7.0	6.1	-	19.1	40.4	40.4

6. Анализ ширин границ сосудов на изображениях глазного дна

Вышеописанный метод был применен для определения уровня размытия изображений глазного дна [7] в задаче автоматического анализа изображений, поступающих на вход автоматической телемедицинской системы с целью отбраковки изображений низкого качества (см. Рис.3).

Тестирование метода показало хорошую надежность предложенного подхода для предварительной оценки качества изображений глазного дна.

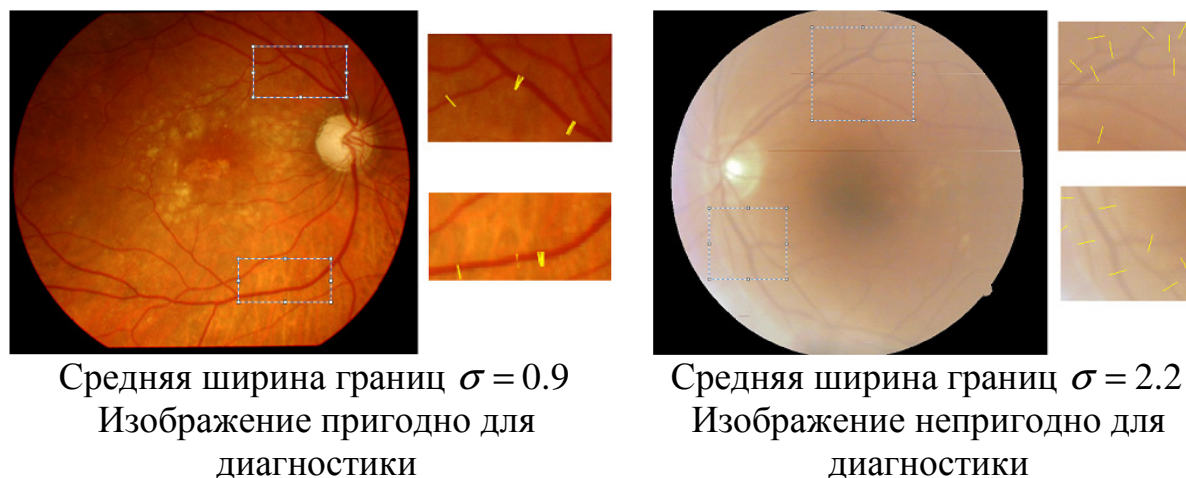


Рис.3. Примеры определения ширин границ изображений глазного дна. На увеличенных фрагментах светлыми чертами обозначены профили границ, для которых определялась ширина.

Литература

1. M. Goncalves and Ernst F., “Single-image motion and camera blur identification,” *Technical report, Philips Research, Eindhoven, PR-TN-2005/00298* (2005).
2. M. Basu, “Gaussian-based edge-detection methods—a survey,” *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C*, **32**, Issue 3, 252–260 (2002).
3. K. Suzuki, I. Horiba, and N. Sugie, “Neural edge enhancer for supervised edge enhancement from noisy images,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **25**, Issue 12, 1582–1596 (2003).
4. H. Hu and G. de Haan, “Low Cost Robust Blur Estimator,” *IEEE International Conference on Image Processing*, 617–620 (2006).
5. E. Nadernejad, “Edge detection techniques: evaluations and comparisons,” *Appl Math Sci*, **2**, 1507–1520 (2008).
6. A.S. Krylov and M. Najafi, “A projection method for edge detection in images,” *J. Comput. Math. Model.*, **18**, 91–101 (2007).
7. A. A. Chernomorets and A. V. Nasonov, “Deblurring in fundus images,” *Proc. Int. Conf. Comp. Graph. GraphiCon'2012. Moscow*, 76–79 (2012).