

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С СОХРАНЕНИЕМ РЕЗКОСТИ ГРАНИЦ

асп. Насонова А.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова,
факультет вычислительной математики и кибернетики,
лаборатория математических методов обработки изображений
<http://imaging.cs.msu.ru/>

Аннотация

Представленный в данной работе подход для повышения разрешения изображений использует деформацию равномерной координатной сетки, на которой задано изображение, таким образом, чтобы пиксели из окрестности размытой границы стали находиться ближе к этой границе пропорционально уровню размытия изображения. Метод повышения разрешения изображений был протестирован на синтетических и реальных изображениях и показал хорошие результаты. Предложенный подход позволяет сохранить резкость границ при повышении разрешения изображений, не повышая уровень шума.

1. Введение

Задача повышения разрешения изображений является широко распространённой задачей обработки изображений. Одной из проблем повышения разрешения изображений является сохранение резкости изображения, которая решается применением алгоритмов повышения резкости изображений к изображению высокого разрешения.

Повышение резкости изображений обычно рассматривается как задача обращения свертки [1]. При таком подходе размытое изображение моделируется как свертка исходного изображения и некоторого ядра размытия [2], [3], [4]. Данная задача является некорректной, и даже малейшая ошибка в оценке ядра размытия может породить сильные артефакты в результирующем изображении. Более качественные результаты обращения свертки могут быть получены методами, подразумевающими наличие дополнительной информации об изображении: например, наличие опорного изображения или приближенного ядра размытия. Однако такие методы имеют очень ограниченную область применения. Методы, не требующие дополнительной информации, имеют более широкую область применения, но результаты далеко не всегда являются удовлетворительными, и нередко размытое изображение более предпочтительно для использования.

В данной работе представлен другой подход для решения задачи повышения разрешения изображений с сохранением резкости. При этом основная обработка происходит в областях, наиболее подверженных влиянию размытия вследствие повышения разрешения — границах изображения. Подход заключается в деформации равномерной координатной сетки, на которой задано изображение, таким образом, чтобы пиксели из окрестности размытой границы стали находиться ближе к этой границе. Далее изображение на деформированной координатной сетке пересчитывается на отмасштабированную равномерную координатную сетку.

В работе [5] представлен алгоритм оценки ширины границы изображения. Метод основан на предположении, что размытие изображения близко к Гауссовому. Изображение разбивается на блоки, внутри каждого из которых уровень размытия подразумевается равномерным. Оценка уровня размытия блока основана на максимуме отношения разности между исходным изображением и двумя его размытыми версиями с разным уровнем дисперсии Гауссова ядра размытия. В данной работе представлен метод оценки ширины границы изображений. Предложен метод оценки дисперсии Гауссова ядра, при свертке идеальной ступенчатой функции с которым может быть получен профиль рассматриваемой границы изображения с достаточным уровнем точности. При этом используется предположение о том, что ядро размытия изображения близко к Гауссовому.

2. Деформация координатной сетки в одномерном случае

Деформация координатной сетки в одномерном случае основывается на предположении, что профиль границы изображения может быть приближен сверткой идеальной ступенчатой функции

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

и Гауссова ядра с дисперсией σ [6]:

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

Целью предложенного метода является нахождение такого преобразования координат профиля границы изображения, чтобы наклон профиля границы стал круче в заранее известных пределах (см. Рис. 1). В случае дискретной границы разрежение не должно привести к появлению разрывов между соседними пикселями, чтобы для дальнейшей интерполяции профиля границы на равномерную сетку изображение содержало достаточно информации.

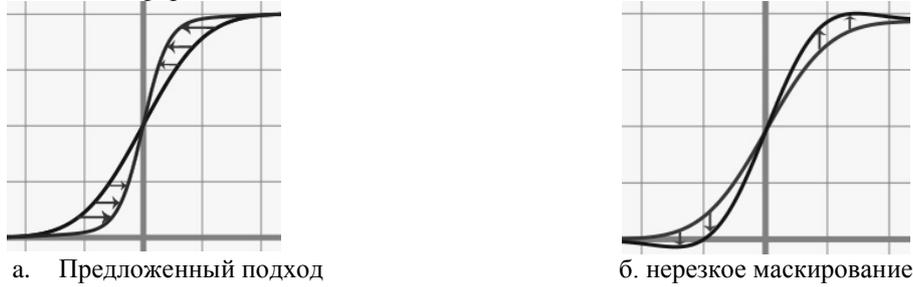


Рис. 1. Повышение резкости в одномерном случае.

Величина смещения точки x в точку $\tilde{x}(x)$ вычисляется при помощи уравнения:

$$\tilde{x} - x = AG'_\sigma(\tilde{x}), \quad (2)$$

которое соответствует следующей физической модели: точка x рассматривается как материальная точка фиксированной массы на наклонной поверхности $E_\sigma(x)$, прикрепленная пружиной к вертикальной оси. Материальная точка под действием силы тяжести оказывается в положении равновесия в точке $\tilde{x}(x)$.

Параметр $A > 0$ отвечает за степень деформации координатной сетки. При увеличении значения параметра A степень деформации координатной сетки увеличивается. Можно показать, что наибольшее значение параметра A , которое не приведет к появлению разрывов на дискретном изображении после деформации координатной сетки, равно:

$$A = \frac{1}{\max_{x \in R} G''_\sigma(x)}.$$

3. Деформация координатной сетки в двумерном случае

Для деформации координатной сетки двумерного изображения в окрестностях заранее детектированных границ был разработан алгоритм, состоящий из следующих этапов:

1. Анализ профиля границы,
2. Вычисление для всех пикселей из окрестности границы расстояния до ближайшего пикселя границы,
3. Вычисление векторного поля смещений, основанное на полученных расстояниях (см. Рис. 2),
4. Интерполяция изображения с деформированной координатной сетки на отмасштабированную равномерную сетку.

В данной работе в качестве входной информации алгоритма используется результат детектора границ Канни [7]. Результат повышения резкости изображения при помощи деформации координатной сетки сильно зависит от детектированных границ. Параметры детектора границ Канни (σ и пороговое значение T_{high}) выбираются индивидуально для каждого изображения.

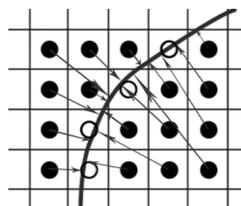


Рис. 2. Смещения для двумерного деформации координатной сетки. Жирная линия обозначает точное положение границы изображения, белые круги обозначают пиксели границы, черные круги обозначают пиксели окрестности границы.

А. Анализ профиля границы

На данном этапе проводится подробный анализ детектированных границ $E = \{e_i\}_1^N$ изображения I . Предполагается, что ширина границы остается неизменной на всем ее протяжении.

Для каждой границы e_i находится точка p_i , принадлежащая этой границе и обладающая максимальным модулем градиента:

$$p_i \in e_i : |\text{grad}(I(p_i))| = \max_{p \in e_i} |\text{grad}(I(p))|.$$

В точке p_i вычисляется профиль $P(p_i)$: изображение интерполируется в направлении градиента в данной точке. Далее для одномерной границы $P(p_i)$ анализируется ее ширина w_i при помощи алгоритма, представленного в работе [6], [8], основанного на подходе нерезкого маскирования. Для всех найденных ширин $\{w_i\}_1^N$ выбирается медианное значение w_{med} и предполагается, что исходное изображение I размыто при помощи Гауссова ядра с дисперсией w_{med} : $I = I_{sharp} * G_{w_{med}}$.

Б. Преобразование расстояний до ближайшей точки границы

Обозначим M множество точек из окрестности границ E , таких что расстояние от каждой из точек множества M до множества E не превышает $3 \cdot w_{med}$: $M = \{p : d(p, E) \leq 3 \cdot w_{med}\}$. Данное значение радиуса окрестности границы обусловлено используемой локализацией Гауссова ядра с дисперсией σ в интервале $[-3\sigma, 3\sigma]$.

Для каждой точки множества M вычисляется евклидово расстояние d до ближайшей точки границы.

В. Векторное поле смещений

Предполагается, что изображение I определено на равномерной координатной сетке, каждому пикселю соответствует координата (x, y) . Целью метода деформации координатной сетки заключается нахождение такого вектора смещения $\vec{v} = \{\Delta x, \Delta y\}$ для каждого пикселя (x, y) , что новая координата $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ находится ближе к границе в терминах Евклидова расстояния.

Для каждой точки p из окрестности границы с расстоянием d до ближайшей точки границы e решается основное уравнение деформации (2) с $x \equiv d$. Решение \tilde{x} представляет собой новое расстояние \tilde{d} до точки границы e , модуль вектора смещения \vec{v} равен $|\vec{v}| = d - \tilde{d}$. Вектор смещения \vec{v} параллелен направлению градиента изображения в точке e и направлен к точке e . Для точек не из окрестности границ вектор смещения полагается нулевым.

Г. Интерполяция изображения

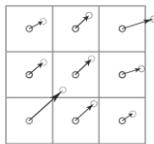
Интерполяция изображения с деформированной координатной сетки на исходную равномерную сетку происходит следующим образом: интенсивность изображения в точке пикселе (i, j) вычисляется как взвешенная сумма интенсивностей всех точек на деформированной координатной сетке, попадающих в окрестность этого пикселя определенного радиуса (см. Рис. 3в): для заданного радиуса r и всех точек из окрестности

$$\{(x_k, y_k) : d_k = \sqrt{(i - x_k)^2 + (j - y_k)^2} \leq r\}_{k=1}^K$$

интерсивность результирующего изображения I_s в пикселе (i, j) вычисляется как

$$I_s(i, j) = \sum_{k=1}^K \frac{1}{D_k} I(x_k, y_k), \text{ где } D_k = \frac{d_k}{\sum_{l=1}^K d_l}.$$

Радиус интерполяции выбирается $r = 1.5 \cdot s$, где s – параметр масштабирования.



а. смещения



б. деформация



в. интерполяция

Рис. 3. Деформация координатной сетки и интерполяция.

4. Результаты

Пример результат работы метода повышения резкости изображений представлен на Рис. 4. Как видно, лучше всего метод работает с сильно выраженными границами изображения. Для коротких границ эффект деформации почти незаметен, а поскольку производительность алгоритма напрямую зависит от количества обрабатываемых границ, сообразно обрабатывать только изолированные сильные границы, такие как базовые контуры [9].

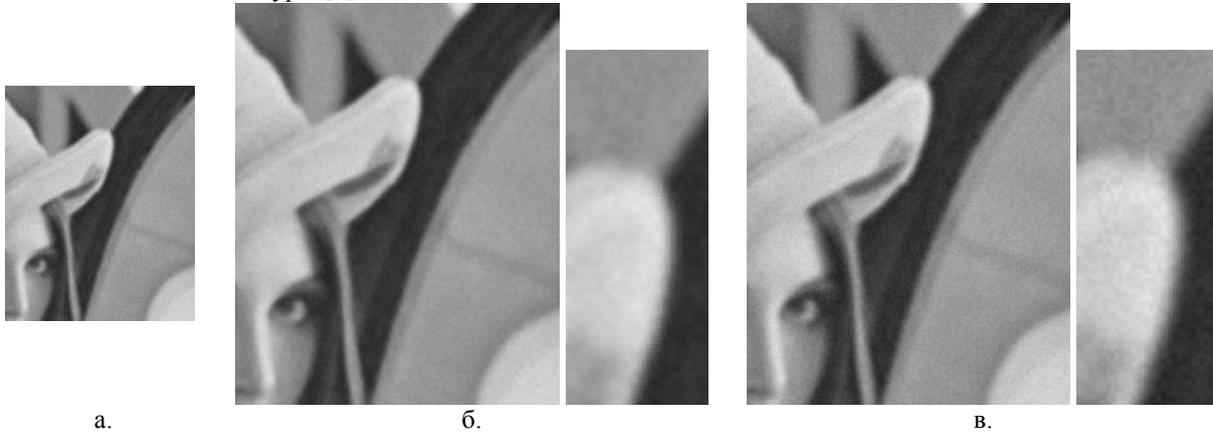


Рис. 4. Результат повышения разрешения фрагмента стандартного изображения Лена в 2 раза.
а. Исходное изображение, размытое с Гауссовым ядром ($\sigma = 2$), с аддитивным равномерным шумом 5%.
б. Интерполяция с деформацией координатной сетки и увеличенный фрагмент.
в. Интерполяция без деформации координатной сетки и увеличенный фрагмент.

Заключение

Представленный метод повышения разрешения изображения эффективен для шумных изображений. Метод не производит артефактов, таких как эффект ложного оконтуривания. Также метод не повышает уровень шума. В случае сильного размытия метод производит сглаживающий эффект в окрестностях границ, что неизбежно, т.к. для полной реконструкции резкой границы на изображении недостаточно информации. Достоинством метода является его автоматизированность.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-07-00438.

Литература

1. M. Almeida and M. Figueiredo, "Parameter estimation for blind and nonblind deblurring using residual whiteness measures," *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 22, pp. 2751–2763, 2013.
2. J. Oliveira, J. M. Bioucas-Dia, and M. Figueiredo, "Adaptive total variation image deblurring: A majorization-minimization approach," *Signal Process.*, vol. 89, pp. 1683–1693, 2009.
3. S. D. Babacan, R. Molina, and A. K. Katsaggelos, "Variational Bayesian blind deconvolution using a total variation prior," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 18, pp. 12–26, 2009.
4. Y. T. et al., "Nonlinear camera response functions and image deblurring: Theoretical analysis and practice," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 35, pp. 2498–2512, 2013.
5. H. Hu and G. de Haan, "Low cost robust blur estimator," in *IEEE International Conference on Image Processing*, 2006, pp. 617–620.
6. A. A. Chernomorets and A. V. Nasonov, "Deblurring in fundus images," in *22-th Int. Conf. Graphi-Con'2012, Moscow, Russia, 2012*, pp. 76–79.
7. J. Canny, "A computational approach to edge detection," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 8, pp. 679–698, 1986.
8. А. А. Насонова и А. С. Крылов, "Определение ширин границ изображения на основе нерезкого маскирования," *Прикладная математика и информатика*, № 42, с. 76–82, 2013.
9. A. V. Nasonov and A. S. Krylov, "Edge quality metrics for image enhancement," *Pattern Recognition and Image Analysis*, vol. 22, pp. 346–353, 2012.