МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ 🛛 =====

Улучшение качества и контрастирование деталей изображений с помощью фильтра геодезического расстояния

В.Н. Карнаухов*, В.И. Кобер*, М.Г. Мозеров*

Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, 127051, Россия Поступила в редколлегию 9.12.2019

Аннотация—Современные методы улучшения и контрастирования деталей изображения, как правило, используют граница-сохраняющие фильтры или билатеральные фильтры. Однако вычислительная сложность классических билатеральных фильтров пропорциональна квадрату числа пикселей изображения, а быстрые алгоритмы не всегда достаточно эффективны или результат фильтрации не всегда соответствует результату оригинального фильтра. В этой статье мы предлагаем заменить классический билатеральный фильтр, фильтром геодезического расстояния, который также относится к классу сверточных преобразований позволяющих улучшить визуальное визуальное восприятие изображений, используя информацию о границах объектов на обрабатываемом изображении. Ядро свертки на основе геодезического расстояния обладает рядом преимуществ, так как допускает рекурсивное вычисление, а следовательно, быструю обработку изображений. Также в статье предложен метод подавления артефактов цветоискажения, с помощью перехода из стандартного RGB представления в представление HSV, которое более сбалансированно относительно восприятия зрения человека. Эффективность предложенного фильтра сравнивается с помощью иллюстраций к статье чтобы читатель мог сравнить качество различных вариантов обработки визуально.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фильтр на основе геодезического расстояния, восстановление мультиспектральных изображений, улучшение и контрастирование деталей изображения.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из задач цифровой обработки изображений является улучшение качества деталей для визуализации. Искажения, ухудшающие восприятие изображения, возникают по различным причинам, связанным с техническими характеристиками оптических систем, движением регистрирующей камеры или объекта и т.д. Поэтому цель контрастирования: максимально приблизить изображение к исходному. При обработке медицинских изображений, дизайне и создании артистической фотографии цели улучшения деталей могут иметь иной смысл и назначение.

Для начала представим основную концепцию улучшения деталей изображения, предполагающую разделение изображения на два слоя, в следующем виде:

$$I = \hat{I} + D,\tag{1}$$

где I — исходное изображение, \hat{I} — изображение на выходе некоторого фильтра, D — разность исходного и преобразованного фильтром изображений. Особенность такого представления заключается в том, что теперь разность D рассматривается как слой деталей изображения. Такой подход в самом деле отражает процесс фильтрации, так как большинство фильтров привносят искажения в область высоких частот [1–3]. На основе представления (1) можно сформулировать базовую концепцию улучшения деталей изображения, как увеличение значения слоя деталей D в выходном изображении.

$$I_{imp} = I + \beta D, \tag{2}$$

где I_{imp} — улучшенное изображение, β — параметр улучшения деталей. Такая концепция была предложена в статьях [4,5] применительно к технике улучшения деталей, основанной на билатеральных фильтрах. Однако схожие концепции формулировались и ранее в работах Л.П. Ярославского [6].

Очевидно, что качество контрастирования и улучшения деталей зависит от вида фильтра, используемого в разложении (1). Прогресс в восстановлении зашумленных изображений и улучшении качества деталей связан, в первую очередь, с появлением билатеральных фильтров [7]. В этом случае окрестность усреднения определяется не только пространственной близостью к восстанавливаемому пикселу, но и близостью в области значений. Такие фильтры широко используются в задачах обработки изображений и компьютерного зрения, таких как стерео [8,9], стерео в движении [10,11], оценка оптического потока [12], улучшение изображений и контрастирование [4, 5], видео абстракция и устранение мозаичного эффекта demosaicing [13, 14]. Однако существенным недостатком фильтров с билатеральным ядром является квадратичная зависимость вычислительной сложности от числа пикселей на изображении. Были предложены быстрые методы [15–18], однако они достаточно сложны в реализации, выход фильтра является неточной аппроксимацией истинного билатерального фильтра и вычислительная сложность зависит от параметров фильтра. В данной статье мы выбрали подкласс билатеральных фильтров, который использует ядро свертки на основе геодезического расстояния. Основанием для такого выбора является то, что такое ядро свертки допускает рекурсивное вычисление, а следовательно, быструю обработку изображений.

За основу мы взяли реализацию фильтра, предложенную в [19]. Заметим, что подход, предложенный в [19] не применялся непосредственно в задачах улучшения деталей и был тестирован на чёрно-белых изображениях. Тогда как в этой работе, рассматриваются мультиспектральные изображения, с использованием стандарта RGB (Red, Green, Blue) для примера. Кроме того, мы предложили использовать пространство цветности HSV (Hue, Saturation, Value) вместо RGB и сохранять оттенок пиксела, равный исходному на изображении. Мотивация такой техники следующая: любая фильтрация цветного изображения искажает цветопередачу исходного изображения, а усиление слоя деталей усугубляет этот эффект.

Статья организована следующим образом: в разделе 2 предложен алгоритм улучшения деталей изображения, основанный на свертке с ядром геодезического расстояния, в разделе 3 приведены экспериментальные результаты и наконец, раздел заключение суммирует наши выводы.

1. УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗОБРАЖЕНТЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРА ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО РАССТОЯНИЯ

Вначале рассмотрим теоретические принципы фильтрации, основанной на свертке с ядром геодезического расстояния:

$$F_q = \frac{1}{W_q} \sum_{p \in V} e^{-ad_{p,q}} f_p,$$

$$W_q = \sum_{p \in V} e^{-ad_{p,q}},$$
(3)

где $p, q, k, l \in V$ — вершины графа изображения G, множество $\varepsilon = (k, l) \in E$ — границы этого графа $G = \{V, E\}$. Веса ядра свёртки $e^{-ad_{p,q}}$ в (3) определены через геодезическое расстояние

между вершинами (p,q), которое может быть определено на изображении I_p с использованием регулярной решетки дискретизации:

$$d_{p,q} = \min_{P_{p,q}} \sum_{\varepsilon \in P_{p,q}} u_{\varepsilon},$$

$$u_{\varepsilon = (k,l)} = \|I_k - I_l\| + \delta,$$
(4)

где $P_{p,q}$ — кратчайший путь между точками (p,q) и δ — компонента обычного евклидова расстояния. Фильтруемый сигнал f_p в (3) может совпадать с изображением I_p , однако чаще это изображение I_p только определяет пространство близости и, в конечном итоге, тип ядра свертки.

Заметим, что параметры фильтра a и δ в (4) приблизительно соответствуют параметрам классического билатерального фильтра следующим образом:

$$a = \frac{2}{\sigma_r^2}, \quad \delta = \frac{\sigma_r^2}{\sigma_s^2},\tag{5}$$

где σ_r^2 и σ_s^2 — дисперсия в области значений сигнала и дисперсия в пространстве изображения, соответственно.

Если искаженное изображение используется в качестве основы для создания пространства близости фильтра, то в некоторых случаях удобно использовать префильтрацию. По этой причине авторы [19] предложили использовать свертку с ядром функции Гаусса перед тем как вычислять пространство близости. В этом случае сначала фильтруется изображение I_p

$$G_{q} = \frac{1}{W_{q}^{G}} \sum_{p \in V} I_{p} e^{-\frac{|p-q|^{2}}{2\sigma_{G}^{2}}},$$

$$W_{q}^{G} = \sum_{p \in V} e^{-\frac{|p-q|^{2}}{2\sigma_{G}^{2}}},$$
(6)

где σ_G^2 — дисперсия ядра свертки. Затем функция G_q используется для вычисления пространства близости в (4), для того чтобы использовать это пространство непосредственно в основном фильтре (3), где f_p — искаженное изображение, а F_q — восстановленное.

Метод, предложенный в статье [19], включает в себя независимую фильтрацию каждого канала. Как отмечалось во вступлении, такая независимая фильтрация приводит к изменению цвета выходного изображения. Кроме того, процесс контрастирования по формуле (2) при значениях $\beta >1$ приводит к тому, что появляются значения больше 255 и меньше 0 и при этом простое, пороговое усечение выходного сигнала может порождать еще большие искажения по цветности.

Перед тем как перейти к экспериментальной части нашего исследования, определим три следующих варианта нормализации улучшенного изображения.

1. Простое усечение по порогу в стандартном представлении RGB:

$$\begin{bmatrix} I^{R,G,B} \end{bmatrix} = \begin{cases} I^{R,G,B} & \text{если } 0 \le I^{R,G,B} \le 255, \\ 0 & \text{если } I^{R,G,B} < 0, \\ 255 & \text{если } I^{R,G,B} > 255. \end{cases}$$
(7)

2. Сбалансированное усечение по порогу максимума компонент в стандартном представлении RGB:

$$\max = \max \left\{ I^{R}, I^{G}, I^{B} \right\},$$

$$\bar{I}^{R,G,B} = \left\{ \begin{array}{l} I^{R,G,B} & \text{если} & I^{R,G,B} \ge 0\\ 0 & \text{иначе} & I^{R,G,B} < 0, \end{array} \right.$$

$$\left[\max\right] = \left\{ \begin{array}{l} \max & \text{если} & \max \le 255\\ 255 & \text{иначе} & \max > 255, \end{array} \right.$$

$$\left\{ I^{R,G,B} \right\} = \left\{ \bar{I}^{R}, \bar{I}^{G}, \bar{I}^{B} \right\} \frac{\left[\max\right]}{\max}.$$

$$(8)$$

3. Простое усечение по порогу в представлении HSV с сохранением компоненты оттенка I^H от исходного сигнала:

$$[I^{S,V}] = \begin{cases} I^{S,V} & \text{если } 0 \le I^{S,V} \le 1\\ 0 & \text{если } I^{S,V} < 0\\ 1 & \text{если } I^{S,V} > 1. \end{cases}$$
(9)

2. ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальная часть была задумана таким образом, чтобы продемонстрировать основные достоинства предлагаемого алгоритма. Так как улучшение деталей изображения в большой мере понятие субъективное, результат представлен в иллюстрациях, чтобы читатель мог сравнить и оценить качество метода визуально. Предлагаемый в статье метод способен улучшать детали на изображении, таким образом улучшая качество восприятия. Чтобы продемонстрировать это, мы провели ряд компьютерных экспериментов и сравнили полученный результат на выходе нашего комбинированного фильтра улучшения деталей с исходным изображением, отфильтрованным с помощью билатерального ядра. То есть на выходе наших экспериментов представлено, помимо исходного, четыре разных изображения $\hat{I}-$ выход свертки с билатеральным ядром, $\left[I_{imp}^{RGB}\right]$ — улучшенное изображение с простым усечением по порогу в стандартном представлении RGB, $\{I_{imp}^{RGB}\}$ — улучшенное изображение с применением сбалансированного усечения по порогу максимума компонент в стандартном представлении роср. [ISV]RGB, $\left[I_{imp}^{S,V}\right]$ — улучшенное изображение с простым усечением по порогу в представлении HSV с сохранением компоненты оттенка I^H от исходного сигнала. Обозначения приведенные выше используются во всех иллюстрациях нашей экспериментальной части. Однако параметры фильтров и коэффициентов усиления деталей на всех трех представленных иллюстративных рисунках разные.

Так, на Рис. 1 параметры нашего фильтра выбраны как: $\sigma_r = \sigma_s = 25$, а коэффициента усиления деталей как: $\beta = 5$. При таких параметрах наиболее хорошо видна разница между сбалансированным усечением по порогу $\{I_{imp}^{RGB}\}$ и пороговым усечением в HSV пространстве $\left[I_{imp}^{S,V}\right]$. Действительно, в последнем случае цветопередача соответствует исходному изображению, таким образом улучшая восприятие изображения зрением.

На Рис. 2 параметры нашего фильтра выбраны как: $\sigma_r = \sigma_s = 7$, а коэффициента усиления деталей как: $\beta = 7$. При таких параметрах разница между сбалансированным усечением по порогу $\{I_{imp}^{RGB}\}$ и пороговым усечением в HSV пространстве $\begin{bmatrix}I_{imp}^{S,V}\end{bmatrix}$ не столь велика и цветопередача соответствует исходному изображению в обоих случаях.



Рис. 1. Результат контрастирования для визуального сравнения. Параметры нашего фильтра выбраны как: $\sigma_r = \sigma_s = 25$, а коэффициента усиления деталей как: $\beta = 5$.

На Рис. 3 параметры нашего фильтра выбраны как: $\sigma_r = 7$, $\sigma_s = \infty$, а коэффициента усиления деталей как: $\beta = 7$. Параметр $\sigma_s = \infty$ означает, что наш фильтр более не чувствителен к границам объектов на изображении, и вырождается в обычную свертку по некоторой пространственной окрестности, с ядром близким к функции Гаусса. При таких параметрах разница между сбалансированным усечением по порогу $\{I_{imp}^{RGB}\}$ и пороговым усечением в HSV пространстве $\left[I_{imp}^{S,V}\right]$ опять становится сильной.

6

КАРНАУХОВ, КОБЕР, МОЗЕРОВ



Рис. 2. Результат контрастирования для визуального сравнения. Параметры нашего фильтра выбраны как: $\sigma_r = \sigma_s = 7$, а коэффициента усиления деталей как: $\beta = 7$.

Анализируя результат представленный на Рис. 1, Рис. 2 и Рис. 3, мы можем сказать что предложенный в статье алгоритм контрастирования улучшает визуальное качество восстановления особенно в случае предложенного порогового усечения в HSV пространстве $\left[I_{imp}^{S,V}\right]$.

В дополнение к иллюстрациям, следует отметить, что вычислительная сложность предложенного алгоритма в три–четыре раза ниже, чем у быстрой реализации билатерального филь-



Рис. 3. Результат контрастирования для визуального сравнения. Параметры нашего фильтра выбраны как: $\sigma_r = 7, \sigma_s = \infty$, а коэффициента усиления деталей как: $\beta = 5$.

тра, что позволяет значительно ускорить процесс обработки, в сравнении с использованием классического билатерального фильтра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе предложена реализация фильтра, основанного на свертке с ядром геодезического расстояния, для улучшения и контрастирования деталей изображения. Что позволяет

значительно ускорить процесс обработки, в сравнении с использованием классического билатерального фильтра. Кроме того, в статье предложен новый подход к проблеме подавления артефактов цветоискажения, с помощью перехода из стандартного RGB представления в представление HSV, которое более сбалансированно относительно восприятия зрения человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Kober V., Karnaukhov V. Restoration of multispectral images degraded by non-uniform camera motion // Journal of Communications Technology and Electronics. 2015. Vol. 60, no. 12. P. 1366–1371.
- Karnaukhov V., Kober V. A fast preview restoration algorithm for space-variant degraded images // Applications of Digital Image Processing XXXIX / International Society for Optics and Photonics. Vol. 9971. 2016. P. 99712W.
- Karnaukhov V., Kober V. Analysis of linear distortion characteristics in problems of restoration of multispectral images // Journal of Communications Technology and Electronics. 2017. Vol. 62, no. 12. P. 1464–1469.
- Fattal R., Agrawala M., Rusinkiewicz S. Multiscale shape and detail enhancement from multi-light image collections // ACM Transactions on Graphics (TOG) / ACM. Vol. 26. 2007. P. 51.
- Farbman Z., Fattal R., Lischinski D., Szeliski R. Edge-preserving decompositions for multi-scale tone and detail manipulation // ACM Transactions on Graphics (TOG) / ACM. Vol. 27. 2008. P. 67.
- Yaroslavsky L. Digital holography and digital image processing: principles, methods, algorithms. Springer Science & Business Media, 2013.
- 7. Tomasi C., Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images // In CVPR. 1998. P. 839–846.
- Mozerov M., van de Weijer J. Accurate stereo matching by two-step energy minimization // IEEE Transactions on Image Processing. 2015. Vol. 24, no. 3. P. 1153–1163.
- Mozerov M. G., van de Weijer J. One-view occlusion detection for stereo matching with a fully connected crf model // IEEE Transactions on Image Processing. 2019. Vol. 28, no. 6. P. 2936–2947.
- Ershov E., Karnaukhov V., Mozerov M. Probabilistic choice between symmetric disparities in motion stereo matching for a lateral navigation system // Optical Engineering. 2016. Vol. 55, no. 2. P. 023101– 023101.
- Mozerov M., van de Weijer J. Improved recursive geodesic distance computation for edge preserving filter // IEEE Transactions on Image Processing. 2017. Vol. 26, no. 8. P. 3696–3706.
- Mozerov M. Constrained optical flow estimation as a matching problem // IEEE Transactions on Image Processing. 2013. Vol. 22, no. 5. P. 2044–2055.
- Ramanath R., Snyder W. E. Adaptive demosaicking // J. Electron. Imag. 2003. Vol. 12, no. 4. P. 633–642.
- Winnemöller H., Olsen S., Gooch B. Real-time video abstraction // ACM Transactions on Graphics. 2006. Vol. 25, no. 3. P. 1221–1226.
- Paris S., Durand F. A fast approximation of the bilateral filter using a signal processing approach // Proc. European Conf. on Computer Vision. 2006. P. 568–580.
- Adams A., Baek J., Davis M. Fast high-dimensional filtering using the permutohedral lattice // Computer Graphics Forum. 2010. Vol. 29, no. 2. P. 753–762.
- Gastal E., Oliveira M. Domain transform for edge-aware image and video processing // ACM Transactions on Graphics. 2011. Vol. 30, no. 4. P. 69.
- Mozerov M. G., van de Weijer J. Global color sparseness and a local statistics prior for fast bilateral filtering // Image Processing, IEEE Transactions on. 2015. Vol. 24, no. 12. P. 5842–5853.
- Karnaukhov V., Mozerov M. Restoration of noisy multispectral images with a geodetic distance filter // Journal of Communications Technology and Electronics. 2018. Vol. 63, no. 6. P. 612–615.

Edge-aware image detail enhancement with geodesic distance filter

Karnaukhov V., Kober V., Mozerov M.

Modern methods of improving and contrasting image details, as a rule, use edge-preserving filters or bilateral filters. However, the computational complexity of classical bilateral filters is proportional to the squared-number of pixels in the image, and fast algorithms are not always efficient enough or the filtering result does not always correspond to the result of the original filter. In this paper, we propose to replace the classic bilateral filter with a filter that based on geodetic distance, which also belongs to the class of convolutional transformations that can improve the visual perception of images using information about the image edges of the processed image. The convolution kernel based on the geodesic distance has several advantages that allow recursive computation and, therefore, fast image processing. In this paper, we also propose a method for color artifacts suppression by switching from the standard RGB representation to the HSV representation, which is more balanced with respect to the perception of human vision. The effectiveness of the proposed filter is compared using the illustrations to the article so that the reader can compare the quality of various processing techniques visually.

KEYWORDS: geodesic distance filter, multispectral image restoration, edge-aware detail enhancement.