

Интерполяция мультиспектральных изображений на основе свертки с ядром геодезического расстояния и оценка качества с помощью критерия индекса структурного сходства¹

В.Н. Карнаухов, М.Г. Мозеров

Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия
Поступила в редколлегию 31.05.2017

Аннотация—Ядро свертки на основе геодезического расстояния обладает рядом преимуществ, так как допускает рекурсивное вычисление, а следовательно, быструю обработку изображений. Кроме того, качество интерполяции некоторых каналов увеличивается при наличии дополнительных каналов изображения с более высоким разрешением, чем интерполируемый слой изображения, что важно для решения задачи интерполяции мультиспектральных изображений. Для оценки качества в статье используется несколько критериев, в том числе индекс структурного сходства. В экспериментальной части статьи показано очевидное преимущество предложенной интерполяции над традиционными методами, в том числе бикубической и билинейной.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: восстановление мультиспектральных изображений, адаптивная интерполяция, билатеральный фильтр

1. ВВЕДЕНИЕ

В процессе формирования, регистрации и передачи по каналам связи мультиспектральные изображения подвергаются различным искажениям, обусловленным отличием реальных оптико-физических параметров изображающих систем от идеальных [1]. Эти искажения затрудняют или даже делают невозможным визуальное восприятие и дальнейшее использование полученных искаженных изображений. Поэтому искаженные изображения необходимо подвергнуть процедуре восстановления, коррекции или улучшения их качества на этапе, предшествующем их визуальному восприятию и дальнейшему использованию. Существует огромное количество работ, посвященных методам восстановления мультиспектральных изображений. В качестве примера можем указать некоторые методы восстановления мультиспектральных изображений, представленные в работах, опубликованных в последнее время:

- восстановление мультиспектральных изображений методами решения обратных задач [2,3],
- коррекция неравномерного освещения на мультиспектральных изображениях [4],
- восстановление искаженных изображений при их масштабировании [1, 5].

В данной работе мы будем рассматривать задачу восстановления искажений мультиспектральных изображений при их масштабировании. Масштабирование изображений играет важную роль в обработке изображений. Поэтому были разработаны различные методы интерполяции, начиная с простых и популярных алгоритмов билинейной и бикубической интерполяции и заканчивая классом полиномиальных и sinc-интерполяций [1]. Масштабирование,

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00150)

как правило, ухудшает качество восстановленного изображения, что обусловлено различными артефактами интерполяции, связанными с потерей высокочастотной информации восстановленного изображения. Поэтому при процедуре прямого и обратного масштабирования с увеличением шага дискретизации (уменьшением размеров изображения) в соотношении более чем 1:2 (и небольшом размере начальной апертуры изображения) качество восстановленного изображения достаточно низкое. Кроме того, для высокой степени масштабирования различия между классической бикубической интерполяцией и sinc-интерполяцией весьма незначительны, и измеряются десятками долями dB по критерию пикового отношения сигнала к шуму (PSNR).

Для исследования свойств предложенных алгоритмов мы использовали мультиспектральные изображения состоящие из трёх каналов видимого света – красный, зелёный, синий (RGB) и одного канала ближнего инфракрасного (NIR) диапазона. Сочетание RGB-NIR во многих случаях дополняет друг друга и позволяет получить детальную информацию в тех областях регистрируемой сцены, где преобладает та или иная длина волны регистрируемого света. С другой стороны, точность оценки параметров смаза в нашей статье так же зависит от длины волны канала. Таким образом, правильно оценивая параметры искажающего оператора по зелёному каналу, можно более точно восстановить искажённое изображение в диапазоне NIR. Все использованные в данной статье мультиспектральные изображения были взяты из базы данных, созданной по материалам статье [6].

В этой статье мы рассматриваем мультиспектральные изображения, которые, как известно, часто используются при дистанционном зондировании [7]. Кроме того, в последнее время стали популярными системы регистрации смешанного диапазона: ближний инфракрасный спектр и каналы обычного видимого света (так называемый RGB-NIR диапазон) [6,8]. В таких системах регистрации нередко масштабы каналов различны. Это связано в первую очередь с оптикой и разрешением матрицы принимающей оптический сигнал. Поэтому мы предлагаем использовать каналы с более высоким разрешением, для восстановления информации в каналах с меньшим разрешением. В этом случае изображение в каналах с более высоким разрешением используется для формирования аффинного пространства признаков, как это делается в билатеральных фильтрах. Билатеральные фильтры (или фильтры сглаживания с сохранением границ), впервые предложенные в 90х годах прошлого века [9, 10], широко используются в задачах обработки изображений и компьютерного зрения, таких как стерео [11, 12], стерео в движении [13, 14], оценка оптического потока [15], улучшение изображений и контрастирование изображений [16].

В данной статье мы выбрали подкласс билатеральных фильтров, который использует ядро свертки на основе геодезического расстояния [17, 18]. Основанием для такого выбора послужили две причины:

- ядро свертки на основе геодезического расстояния допускает рекурсивное вычисление, а следовательно, быструю обработку изображений;
- сигнал в каналах мультиспектрального изображения может отличаться визуально, однако основные границы объектов в изображениях каждого канала сильно коррелируют между собой.

Поэтому аффинное пространство, основанное на геодезическом расстоянии, как нельзя лучше подходит для нашей задачи интерполяции. Быстрый фильтр ядра свертки на основе геодезического расстояния был предложен и реализован в работе [19], а затем улучшен в [20]. Тем не менее, оба фильтра могут создавать нежелательные артефакты, описанные в тех же работах. Поэтому в данной статье мы будем использовать быстрый алгоритм, предложенный в [21], в котором отсутствуют указанные выше артефакты. Для оценки качества восстановленного изображения в статье используется несколько критериев, в том числе индекс структурного сходства (SSIM) [22]. В экспериментальной части статьи показано очевидное преимущество

предложенного метода интерполяции над традиционными методами, в том числе над бикубической и билинейной.

Статья организована следующим образом: в разделе 2 предложен новый алгоритм адаптивной интерполяции, основанный на свертке с ядром геодезического расстояния, в разделе 3 приведены экспериментальные результаты по автоматическому восстановлению мультиспектральных изображений и наконец раздел заключение суммирует наши выводы.

2. ПОСТАНОВКА И СПОСОБ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ АДАПТИВНОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ

Будем предполагать, что канал мультиспектрального изображения с меньшим пространственным разрешением есть результат масштабирования с коэффициентом масштабирования s . Область определения не масштабированного изображения:

$x, y \in \Omega = \{0, \dots, X - 1; 0, \dots, Y - 1\}$, а область определения масштабированного изображения, соответственно: $u, v \in \Phi = \{0, \dots, U - 1; 0, \dots, V - 1\}$, где $U = X/s$ и $V = Y/s$. Согласно оптической модели регистрации изображений, изображение с низким разрешением есть результат некоторой свертки:

$$\hat{f}(u, v) = \sum_{x, y \in \Omega} \vartheta(su, sv, x, y) f(x, y), \quad (1)$$

где ядро свертки ϑ обычно рассматривается как пространственная гауссиана. Здесь \hat{f} – масштабированное изображение, а f – искомое изображение, подлежащее восстановлению. Обратное масштабирование, или интерполяция, также может рассматриваться как процедура свертки с некоторым ядром в пространственной области. Так как мы будем рассматривать интерполяцию с коэффициентом $s > 2$, где различие между бикубической и sinc-интерполяцией незначительны, поэтому предложенный в статье алгоритм мы будем сравнивать с тремя классическими и наиболее используемыми методами: нулевой интерполяцией (дополнение ближайшим значением), биквадратной и бикубической интерполяциями. Для простоты формализации спроецируем масштабированное изображение \hat{f} на область определения восстанавливаемого изображения с использованием карты коэффициентов достоверности $c(x, y)$:

$$\hat{f}(x, y) = c(x, y) \hat{f}(u/s, v/s), \quad (2)$$

где карта достоверности выбрана следующим образом:

$$c(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } \text{mod}(u/s) \& \text{mod}(v/s) = 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3)$$

Нули этой карты коэффициентов достоверности однозначно определяют пиксели изображения, в которых нет информации и в которых значения искомой функции f должны быть восстановлены с помощью известных значений в пикселях, где $c(x, y) = 1$. Классическая интерполяция предполагает свертку в некоторой пространственной окрестности:

$$\begin{aligned} \tilde{f}(x, y) &= \frac{1}{W} \sum_{\xi, \eta \in \Omega} w(x, y, \xi, \eta) c(x, y) \hat{f}(x, y) \\ W &= \sum_{\xi, \eta \in \Omega} w(x, y, \xi, \eta) c(x, y), \end{aligned} \quad (4)$$

где W – коэффициент нормализации, $\tilde{f}(x, y) \approx f(x, y)$ – восстановленная функция, а $w(x, y, \xi, \eta)$ – некоторое пространственное ядро свертки: $w(x, y, \xi, \eta) = g(\|x - \xi, y - \eta\|)$.

Чтобы понять основную идею нашего алгоритма, рассмотрим для начала биквадратную интерполяцию. Ядро свертки в этом случае состоит из максимум четырех ненулевых весов

$w(x, y, \xi, \eta)$ в окрестности восстанавливаемой точки (x, y) . Чем ближе точка (ξ, η) , тем выше ее влияние, а следовательно, и больше ее вес w . Теперь допустим, что мы знаем насколько близки значения восстанавливаемой функции \tilde{f} в точках (x, y) и (ξ, η) . Разумно было бы увеличить вес w если такое “расстояние” было бы невелико, более того, если бы значения были бы одинаковы, вес необходимо было бы сделать как можно большим, чтобы значения восстановленного изображения совпали с исходным. Однако, в нашей задаче вычислить такое “расстояние” невозможно, так как значение $\tilde{f}(x, y)$ – искомого.

Поэтому мы делаем предположение, что расстояние между значениями сигнала в восстанавливаемом канале пропорциональны такому же расстоянию в не масштабированном канале $\|\tilde{f}(x, y) - \tilde{f}(\xi, \eta)\| \propto \|f^{add}(x, y) - f^{add}(\xi, \eta)\|$. Здесь f^{add} обозначены каналы, не требующие интерполяции. Если мы интерполируем изображение в NIR диапазоне, то дополнительной функцией f^{add} будет обычное RGB изображение и наоборот.

В качестве расстояния между интерполируемыми пикселями (x, y) и пикселями, где значение восстанавливаемой функции известно (ξ, η) , мы предлагаем использовать геодезическое расстояние, учитывающее как пространственную составляющую, так и значение сигнала между измеряемыми точками. Для упрощения заменим $q = (x, y)$ и $p = (\xi, \eta)$ и перепишем формулу интерполяции (4) в форме, включающей геодезическое расстояние:

$$\begin{aligned} \tilde{f}_q &= \frac{1}{W_q} \sum_{p \in V} e^{-ad_{p,q}} c_p \hat{f}_p, \\ W_q &= \sum_{p \in V} e^{-ad_{p,q}} c_p, \end{aligned} \quad (5)$$

где $p, q, k, l \in V$ – вершины графа изображения, множество $\varepsilon = (k, l) \in E$ – границы этого графа $G = \{V, E\}$. Веса ядра свёртки $w_{p,q} = e^{-ad_{p,q}}$ в (5) определены через геодезическое расстояние $d_{p,q}$ между вершинами (p, q) дополнительного канала f_p^{add} , которое в свою очередь, определено как:

$$\begin{aligned} d_{p,q} &= \min_{P_{p,q}} \sum_{\varepsilon \in P_{p,q}} z_{\varepsilon=(k,l)}, \\ z_{\varepsilon=(k,l)} &= \|f_k^{add} - f_l^{add}\| + \delta, \end{aligned} \quad (6)$$

где $P_{p,q}$ – произвольный путь между двумя вершинами графа изображения (p, q) и δ – некоторый пространственный коэффициент. Параметры a и δ приблизительно соответствуют параметрам классического билатерального фильтра:

$$e^{-\frac{(f_p^{add} - f_q^{add})^2}{2\sigma_r^2}} e^{-\frac{(p-q)^2}{2\sigma_s^2}} \quad (7)$$

как

$$a = \frac{2}{\sigma_r^2}, \delta = \frac{\sigma_r^2}{\sigma_s^2}, \quad (8)$$

где σ_r^2 и σ_s^2 – дисперсия в области значений и в пространственной области соответственно.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В первой части экспериментального раздела статьи даётся сравнение качества интерполяции по критериям PSNR и SSIM, полученной с помощью предложенного алгоритм и классических методов интерполяции: ближайшее значение (БЗ), биквадратная интерполяция (БиКв) и бикубическая интерполяция (БиКуб).

Таблица 1. Сравнение качества интерполяции при восстановлении инфракрасного канала, с использованием не масштабированных RGB каналов по критерию PSNR и SSIM (значения даны в скобках)

Метод	БЗ	БиКв	БиКуб	Наш метод
<i>Виноградник</i>				
$s = 5$	25.1(0.60)	26.8(0.70)	26.8(0.72)	29.4(0.74)
$s = 10$	23.9(0.46)	25.2(0.57)	25.3(0.59)	27.0(0.61)
$s = 15$	23.3(0.40)	24.6(0.50)	24.7(0.52)	26.0(0.52)
<i>Поле</i>				
$s = 5$	24.2(0.61)	25.5(0.67)	25.6(0.68)	26.3(0.68)
$s = 10$	22.4(0.47)	23.4(0.53)	23.6(0.56)	23.9(0.56)
$s = 15$	21.3(0.37)	22.4(0.44)	22.6(0.46)	22.8(0.49)
<i>Переход</i>				
$s = 5$	24.3(0.80)	26.2(0.84)	26.7(0.84)	28.5(0.90)
$s = 10$	21.7(0.64)	23.0(0.69)	23.2(0.70)	24.3(0.79)
$s = 15$	20.9(0.53)	21.9(0.59)	22.0(0.60)	22.6(0.70)
<i>Аэропорт</i>				
$s = 5$	24.1(0.65)	25.7(0.71)	26.0(0.72)	26.8(0.77)
$s = 10$	21.4(0.51)	22.8(0.57)	23.1(0.59)	23.6(0.67)
$s = 15$	20.1(0.43)	21.3(0.48)	21.6(0.50)	21.8(0.59)

Для наших экспериментов были взяты четыре мультиспектральных изображения из базы данных статьи [6]: Виноградник, Поле, Переход и Аэропорт. В Таблице 1 представлено сравнение качества интерполяции при восстановлении инфракрасного канала, с использованием не масштабированных RGB каналов, в Таблице 2 дано сравнение качества интерполяции при восстановлении RGB каналов, с использованием не масштабированного инфракрасного канала. Во всех наших экспериментах мы установили внутренние параметры фильтра нашего алгоритма как $\sigma_r = 15$ и $\sigma_s = s$. Можно видеть, что точность восстановления изображений с помощью предложенного алгоритма значительно превосходит точность интерполяции других методов. Критерий индекса структурного сходства - SSIM в большей степени соответствует зрительному восприятию человека и приблизительно соответствует оценке линейной шкалы от нуля до единицы. Так оценке "три" соответствует значение 0.6. Мы выбрали этот критерий потому, что в некоторых случаях не понятно, на сколько тот или иной алгоритм работает лучше по субъективному критерию зрительного восприятия. Например, в Таблице 1 качество бикубической интерполяции по SSIM изображения Переход при $s = 10$ равно качеству предложенной интерполяции, но для коэффициента сжатия $s = 15$. Хотя по критерию PSNR точность восстановления несколько ниже при таких же $s = 10$ и $s = 15$.

Во второй части экспериментального раздела статьи даётся сравнение качества интерполяции по визуальному критерию, полученной с помощью предложенного алгоритм и классических методов интерполяции: ближайшее значение, биквадратная интерполяция и бикубическая интерполяция. Для наших экспериментов были взяты те же четыре мультиспектральных изображения из базы данных статьи [6]: Виноградник, Поле, Переход и Аэропорт.

На Рис. 1 (а) можно увидеть эти исходные изображения. Затем каждое из четырёх изображений масштабированное с коэффициентом $s = 15$ восстанавливается различными методами: ближайшее значение (БЗ); биквадратная интерполяция (БиКв); бикубическая интерполяция (БиКуб); предложенный метод (Наш метод). В этом случае восстановление инфракрасного канала производится с использованием не масштабированных RGB каналов. На Рис. 2 представлен аналогичный эксперимент, но в этом эксперименте восстановление RGB каналов производится с использованием не масштабированного инфракрасного канала.

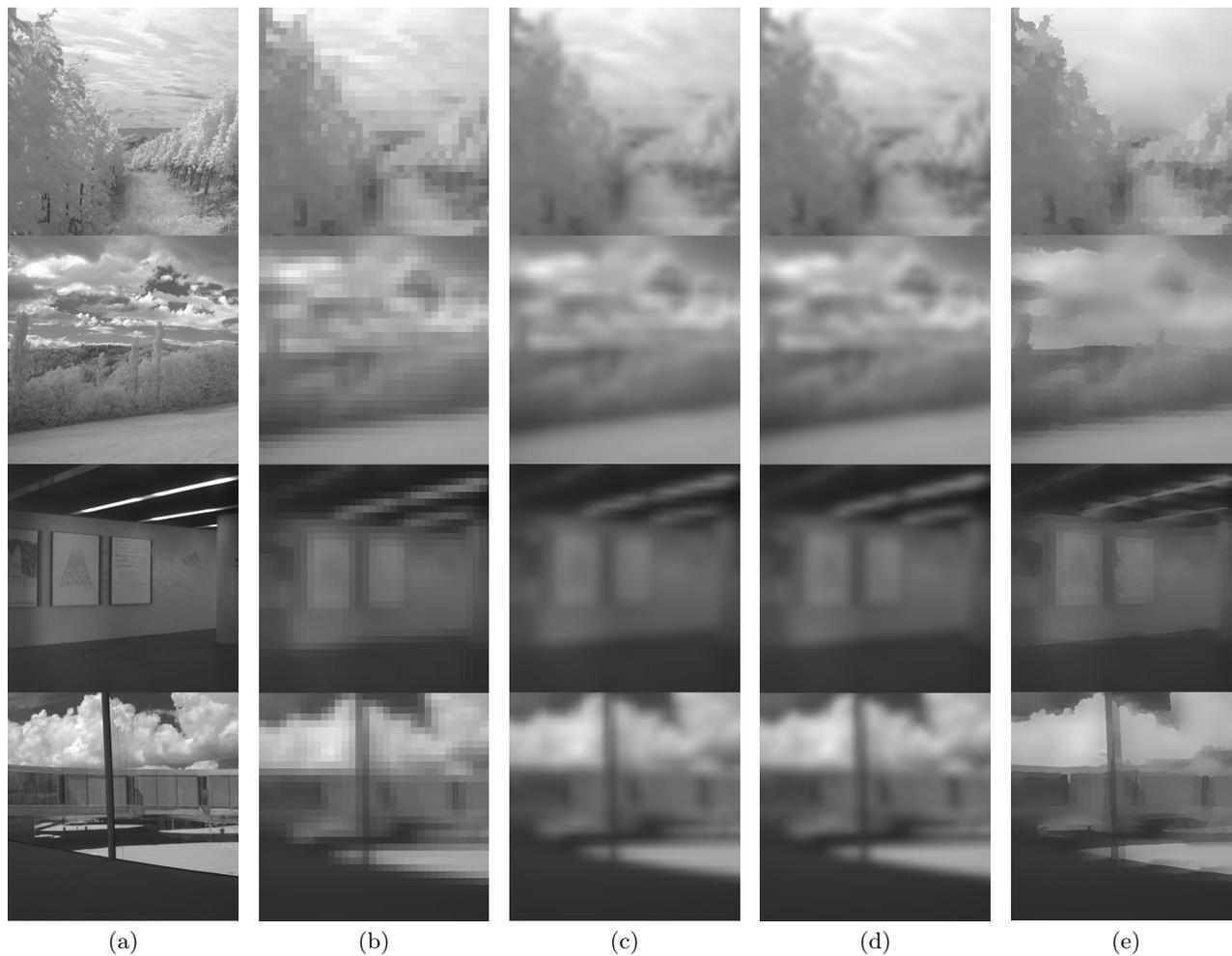


Рис. 1. Сравнение качества интерполяции при восстановлении инфракрасного канала, с использованием не масштабированных RGB каналов по критерию визуального сравнения при коэффициенте масштабирования $s = 15$. Методы интерполяции: (b) ближайшее значение; (c) биквадратная интерполяция; (d) бикубическая интерполяция; (e) предложенный метод.

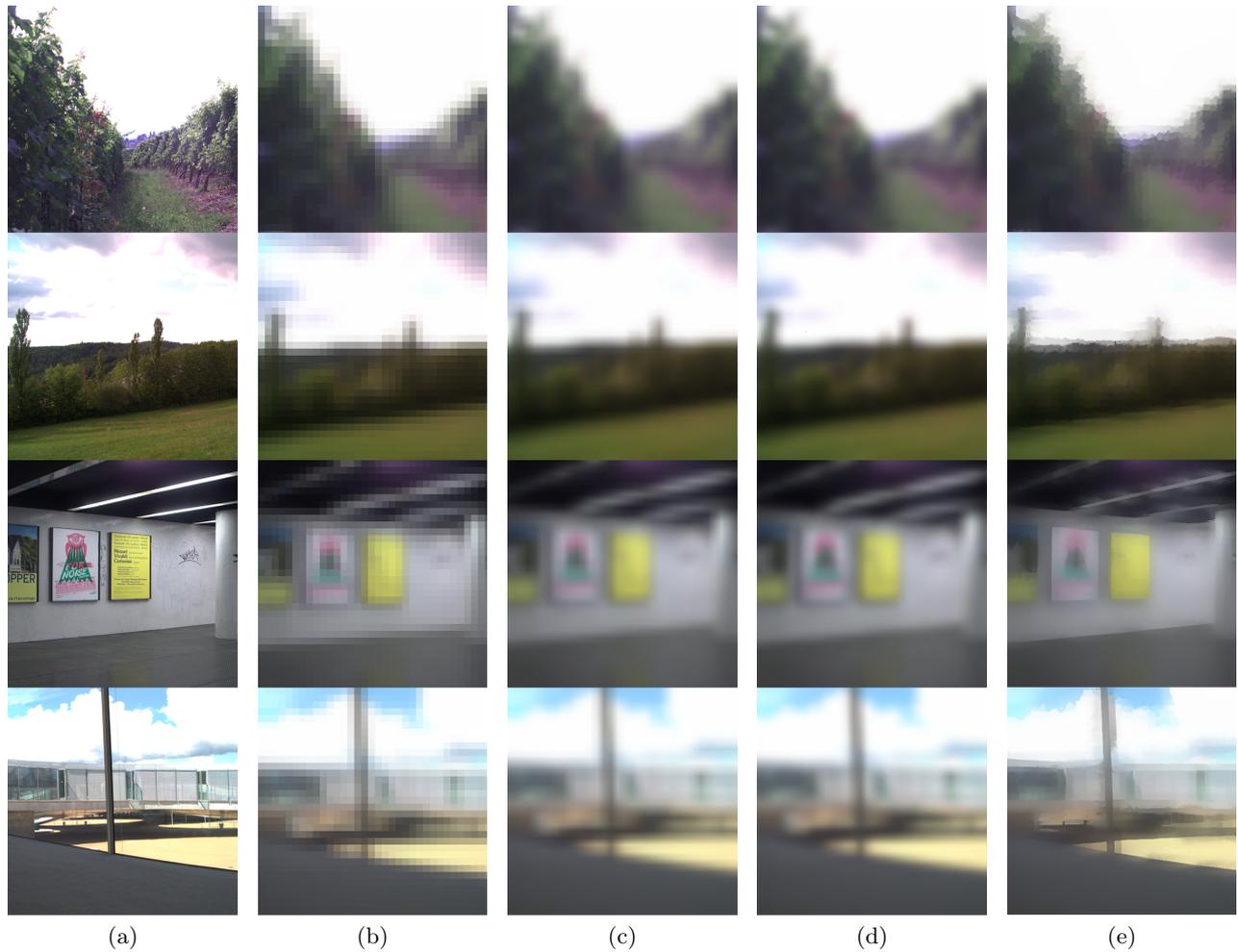


Рис. 2. Сравнение качества интерполяции при восстановлении RGB каналов, с использованием не масштабированного инфракрасного канала по критерию визуального сравнения при коэффициенте масштабирования $s = 15$. Методы интерполяции: (b) ближайшее значение; (c) биквадратная интерполяция; (d) бикубическая интерполяция; (e) предложенный метод.

Таблица 2. Сравнение качества интерполяции при восстановлении RGB каналов, с использованием не масштабированного инфракрасного канала по критерию PSNR и SSIM (значения даны в скобках)

Метод	БЗ	БиКв	БиКуб	Наш метод
<i>Виноградник</i>				
$s = 5$	21.4(0.54)	22.1(0.56)	22.1(0.57)	23.6(0.58)
$s = 10$	20.3(0.44)	20.9(0.46)	21.0(0.47)	22.2(0.51)
$s = 15$	19.6(0.39)	20.03(0.42)	20.4(0.43)	21.6(0.49)
<i>Поле</i>				
$s = 5$	24.6(0.72)	26.1(0.76)	26.2(0.77)	27.7(0.78)
$s = 10$	22.2(0.62)	23.9(0.67)	24.1(0.68)	25.2(0.71)
$s = 15$	20.6(0.54)	22.5(0.61)	22.8(0.62)	23.6(0.68)
<i>Переход</i>				
$s = 5$	21.4(0.59)	23.0(0.65)	23.3(0.66)	23.9(0.71)
$s = 10$	19.2(0.44)	20.4(0.51)	20.6(0.53)	21.1(0.60)
$s = 15$	18.3(0.35)	19.3(0.43)	19.5(0.45)	19.8(0.53)
<i>Аэропорт</i>				
$s = 5$	21.0(0.64)	22.3(0.68)	22.5(0.70)	24.5(0.78)
$s = 10$	18.7(0.51)	19.7(0.55)	20.0(0.57)	21.6(0.71)
$s = 15$	17.6(0.42)	18.5(0.46)	18.7(0.48)	19.7(0.62)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен алгоритм восстановления с использованием фильтра с ядром свертки на основе геодезического расстояния. Такой фильтр обладает рядом преимуществ, так как допускает рекурсивное вычисление, а следовательно, быструю обработку изображений. Использование данного фильтра позволяет повысить качество интерполяции некоторых каналов при наличии дополнительных каналов изображения с более высоким разрешением, что важно для решения задачи интерполяции мультиспектральных изображений. Экспериментальная часть этой статьи подтвердила, что точность восстановления изображений с помощью предложенного алгоритма значительно превосходит точность интерполяции других методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yaroslavsky L. Digital holography and digital image processing: principles, methods, algorithms. Springer Science & Business Media, 2013.
2. Karnaukhov V., Kober V. A fast preview restoration algorithm for space-variant degraded images // Proc. SPIE 9971, Applications of Digital Image Processing XXXIX. 2016. P. 99712W–7.
3. Karnaukhov V., Kober V. Blind identification of linear degradation operators in the fourier domain // Proc. SPIE's 60 Annual Meeting: Applications of Digital Image Processing XXXVIII. 2015. P. 95992I–7.
4. Kober V., Karnaukhov V. Adaptive correction of nonuniform illumination of multispectral digital images // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. Vol. 61, no. 12. P. 1419–1425.
5. Asamwar R. S., Bhurchandi K. M., Gandhi A. S. Interpolation of images using discrete wavelet transform to simulate image resizing as in human vision // International Journal of Automation and Computing. 2010. Vol. 7, no. 1. P. 9–16.
6. Brown M., Süsstrunk S. Multispectral SIFT for scene category recognition // Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR11). Colorado Springs, 2011. June. P. 177–184.
7. Borengasser M., Hungate W. S., Watkins R. Hyperspectral remote sensing: principles and applications. Crc Press, 2007.
8. Karnaukhov V., Mozerov M. Restoration of multispectral images by the gradient reconstruction method and estimation of the blur parameters on the basis of the multipurpose matching model // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. Vol. 61, no. 12. P. 1426–1431.

9. Aurich V., Weule J. Non-linear gaussian filters performing edge preserving diffusion // *Mustererkennung* 1995. Springer, 1995. P. 538–545.
10. Tomasi C., Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images // In *CVPR*. 1998. P. 839–846.
11. Mozerov M., Gonzalez J., Roca X., Villanueva J. J. Trinocular stereo matching with composite disparity space image // *ICIP*. 2009. P. 2089–2092.
12. Mozerov M. G., van de Weijer J. Accurate stereo matching by two-step energy minimization // *Image Processing, IEEE Transactions on*. 2015. Vol. 24, no. 3. P. 1153–1163.
13. Mozerov M., Kober V., Choi T. S. Improved motion stereo matching based on a modified dynamic programming // *Optical Engineering*. 2001. Vol. 40(10). P. 2234–2239.
14. 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.
15. Mozerov M. Constrained optical flow estimation as a matching problem // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2013. Vol. 22, no. 5. P. 2044–2055.
16. 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.
17. Criminisi A., Sharp T., Blake A. Geos: Geodesic image segmentation // *Computer Vision–ECCV* 2008. Springer, 2008. P. 99–112.
18. Wang P., Zeng G., Gan R. et al. Structure-sensitive superpixels via geodesic distance // *International journal of computer vision*. 2013. Vol. 103, no. 1. P. 1–21.
19. Gastal E., Oliveira M. Domain transform for edge-aware image and video processing // *ACM Transactions on Graphics*. 2011. Vol. 30, no. 4. P. 69.
20. Yang Q. Recursive bilateral filtering // *Proc. European Conf. on Computer Vision*. 2012. P. 399–413.
21. 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.
22. Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity // *IEEE transactions on image processing*. 2004. Vol. 13, no. 4. P. 600–612.

Multispectral image interpolation with geodesic distance based kernel and quality estimation with structural similarity index criterion

Karnaukhov V., Mozerov M.

Geodesic based kernel is powerful tool for image processing, because can be calculated recursively and thus, fast. Using the filter with geodesic distance based kernel make the interpolation more accurate in the case of additional channels, which possessed higher resolution than the interpolated ones. In addition, this is important property of the presented filter. We estimate and compare the reconstruction quality on the base of two popular criteria: PSNR and SSIM. Our experiments demonstrate obvious advantages of the proposed interpolation method over classic bi-cubic and bi-quadratic interpolation algorithms.

KEYWORDS: multispectral image restoration, adaptive interpolation, bilateral filter.