

Восстановление мультиспектральных изображений методом реконструкции градиентов и оценка параметров смаза на основе модели многоцелевого согласования¹

В.Н. Карнаухов, М.Г. Мозеров

Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, 127051, Россия
Поступила в редколлегию 15.06.2016

Аннотация—В статье предлагается оригинальный метод восстановления мультиспектральных изображений, основанный на реконструкции градиентов. Метод использует простое соотношение между градиентом соседних точек в искажённом изображении и градиентом удалённых точек в исходного изображения. Результат восстановления с помощью предложенного алгоритма превосходит стандартный метод на основе винеровской фильтрации. В статье предлагается также новый метод оценки параметров искажающего оператора смаза движения. Смазанное изображение в этом случае рассматривается, как суперпозиция M сдвинутых оригинальных изображений. В этом случае автокорреляционная свёртка искажённого изображения представима в виде линейной комбинация M^2 взаимных свёрток нескольких идентичных сдвинутых изображений. Таким образом, автокорреляционная функция искажённого изображения представляет собой прямую линию, проходящую через центр при этом направление этой линии и её длина совпадают с параметрами искажающего оператора. Предложенный метод демонстрирует более точную оценку параметров смаза движения в сравнении с лучшими современными алгоритмами. Кроме того, метод затрачивает на вычисление параметров значительно меньше времени, чем популярные алгоритмы оценки, основанные на преобразовании Радона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: восстановление мультиспектральных изображений, смаз движения, оценка параметров смаза

ВВЕДЕНИЕ

Относительное движение между камерой и регистрируемым объектом является основной причиной смаза на изображении. Цель алгоритмов восстановления: воссоздать изображение наиболее приближённое к оригиналу. Методы восстановления изображений, искажённых оператором смаза используются во многих приложениях связанных с компьютерным зрением и обработкой изображения [1]. Современные методы восстановления смазанных изображений часто используют параметрическое восстановление [2]–[6], то есть предполагается, что параметры искажения известны. Поэтому первым шагом на пути решения проблемы восстановления является оценка параметров искажения, которые, чаще всего не известны заранее [7, 8]. Кроме того, задача оценки параметров смаза близка к задачам оценки движения и может быть использована для калибровки камеры автономной навигации [9]. В настоящее время можно выделить три основных группы алгоритмов, используемых для оценки параметров смаза движения:

– Кепстральные методы [10, 11];

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

- Алгоритмы поворачивающихся фильтров [12, 13];
- Алгоритмы, основанные на преобразовании Радона [5, 14].

Кепстральный метод достаточно прост и не требует больших вычислительных затрат, однако точность определения параметров смаза этого метода уступает другим методам, кроме того эта техника оценки чувствительна к шуму. Методы, основанные на преобразовании Радона в настоящее время считаются наиболее точными при оценке параметров искажения смаза, однако такая техника оценки требует значительных вычислительных затрат по времени.

В этой статье предлагается два новых подхода в задаче восстановления смазанных изображений, как для самого параметрического восстановления, так и для определения параметров искажающего оператора. Предложенное параметрическое восстановление смазанных изображений основано на простом соотношении между градиентом соседних точек в искажённом изображении и градиентом удалённых точек в исходного изображения. Результат восстановления с помощью предложенного алгоритма превосходит стандартный метод на основе винеровской фильтрации. Также предложен метод оценки параметров смаза который в среднем превосходит результаты вычислений на основе преобразования Радона, при этом наш алгоритм работает значительно быстрее. Для оценки параметров смаза в статье предложена модель много целевого согласования. Искажённое изображение в этой модели представлено, как суперпозиция M исходных изображений. Таким образом, произвольная пара таких изображений может быть согласована друг с другом, как сдвиг с некоторым вектором в соответствии с парадигмой оптического потока [15]. Так как вектор сдвига имеет один и тот же угол для всех пар, то в плоскости автокорреляционной свёртки каждая пара будет отмечена своим собственным пиком и все эти пики будут лежать на линии проходящей через центр автокорреляционной функции с направлением, совпадающим с углом смаза движения ϑ .

Для исследования свойств предложенных алгоритмов мы использовали мультиспектральные изображения состоящие из трёх каналов видимого света – красный зелёный синий (КЗС) и одного канала ближнего инфракрасного (БИК) диапазона. Сочетание КЗС-БИК 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 БИК. Все использованные в данной статье мультиспектральные изображения были взяты из базы данных созданной по статье [16].

Статья организована следующим образом: в разделе 1 предложен новый алгоритм восстановления, основанный на реконструкции градиентов, в разделе 2 описан новый алгоритм оценки параметров смаза, в разделе 3 приведены экспериментальные результаты по автоматическому восстановлению мультиспектральных изображений.

1. МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ГРАДИЕНТОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СМАЗАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Допустим I – исходное неискажённое изображение и \tilde{I} – изображение, искаженное смазом с некоторыми параметрами: L – длина смаза и ϑ – угол направления смаза. В случае линейного приближения оператор смаза движения может быть представлен следующим образом:

$$\tilde{I}(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^L I(x + m \cos \vartheta, y + m \sin \vartheta), \quad (1)$$

где $M = L + 1$ – число сдвинутых исходных изображений в аддитивной модели. Рассмотрим градиент функции \tilde{I} по направлению Δ_ϑ :

$$\Delta_\vartheta \tilde{I}(x, y) = \tilde{I}(x + \cos \vartheta, y + \sin \vartheta) - \tilde{I}(x, y) \quad (2)$$

или, делая подстановку в (2) из (1), получаем:

$$I(x + M \cos \vartheta, y + M \sin \vartheta) - I(x, y) = M \Delta_\vartheta \tilde{I}(x, y). \quad (3)$$

Таким образом, "длинный" градиент (когда вычисляется разность не между соседними значениями функции, а между удалёнными в M раз точками этой функции) искомой функции по направлению Δ_ϑ выражается через значения "коротких" градиентов искажённой функции. Так как, зная значения градиентов некоторой одномерной функции (в нашем случае это произвольная линия вдоль направления смаза), можно восстановить эту функцию с точностью до константы:

$$I(x, y) = I(x - M \cos \vartheta, y - M \sin \vartheta) + M \Delta_\vartheta \tilde{I}(x, y) + C(\vartheta), \quad (4)$$

Если значения координат $[x - M \cos \vartheta, y - M \sin \vartheta]$ восстанавливаемой функции I не входит в область определения, то значения этой функции в (4) необходимо положить равными нулю $I(x, y) = 0$. Неизвестную константу $C(\vartheta)$ можно вычислить из очевидного предположения о равенстве средних значений исходного изображения и изображения, искажённого оператором смаза: $\langle I(x, y) \rangle_\vartheta = \langle \tilde{I}(x, y) \rangle_\vartheta \Rightarrow C(\vartheta) = \langle \tilde{I}(x, y) \rangle_\vartheta - \langle I(x, y) \rangle_\vartheta$.

Таким образом, если параметры смаза L и ϑ известны, то задача восстановления сводится к вычислению искомой функции по простой формуле (4). В следующем разделе мы покажем как оценить эти параметры по искажённому наблюдаемому изображению.

2. МОДЕЛЬ МНОГОЦЕЛЕВОГО СОГЛАСОВАНИЯ И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СМАЗА ДВИЖЕНИЯ

Искажающий оператор в (1) является общепринятой моделью описания процесса смаза изображения (например [3]). Однако для модели согласования объектов, удобнее рассматривать не само изображение, а его градиентное представление. Для этого перепишем уравнение (1) в следующей форме:

$$\tilde{f}(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^L f(x + m \cos \vartheta, y + m \sin \vartheta), \quad (5)$$

где f комплексная функция вида:

$$f(x, y) = I(x + 1, y) - I(x, y) + i(I(x, y + 1) - I(x, y)). \quad (6)$$

Подставим выражение $f_m(x, y) = f(x + (m - 1) \cos \vartheta, y + (m - 1) \sin \vartheta)$ в уравнение (5), тогда:

$$\tilde{f}(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M f_m(x, y). \quad (7)$$

Уравнение (7) означает, что наблюдаемое искажённое изображение \tilde{f} состоит из M сдвинутых повторов f_m исходного изображения градиентов. Поэтому естественно допустить что изображение f_m согласуется с любым другим изображением f_k при этом каждому такому согласованию соответствует некоторый вектор взаимного сдвига, угол которого в поляной системе

координат соответствует углу оператора смаза $|\vartheta|$ и длиной равной $|m - k|$. Такой взаимный вектор сдвига совпадает с корреляционным пиком в плоскости функции $g_{m,k} = f_m * f_k$. Следовательно, корреляционная функция изображения градиентов будет являться суммой попарных корреляций $g_{m,k}$:

$$g = \tilde{f} * \tilde{f} = \frac{1}{M^2} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^M g_{m,k}. \quad (8)$$

Если пик каждой такой корреляции $g_{m,k}$ дельта функция, функция g представляет собой чёткую линию под углом ϑ , а длина линии выражается как:

$$g(\rho|\vartheta^{ES}) \propto M(M - \rho), \quad (9)$$

где ϑ^{ES} оценка угла смаза и область определения ρ is $0 \leq \rho \leq M$.

Автокорреляционная функция реальных изображений выглядит, как в теории. Поэтому можно определить угол смаза ϑ по максимуму интеграла вдоль произвольного направления:

$$\vartheta = \arg \max_{\vartheta} Q(\vartheta), \quad (10)$$

где $Q(\vartheta)$ интеграл вдоль произвольного угла в полярной системе координат в области автокорреляционной функции g :

$$Q(\vartheta) = \sum_{p=-P}^{p=P} 2g(p, \vartheta) - (g^{lft}(p, \vartheta) + g^{rgt}(p, \vartheta)). \quad (11)$$

Здесь P максимальная длина оцениваемого смаза в пикселах; а $g^{lft}(\rho|\vartheta)$ и $g^{rgt}(\rho|\vartheta)$ два дополнительных направления интегрирования, используемые для получения более точной оценки. В самом деле, значение функции g вдоль истинного направления смаза должно быть локальным максимумом и в направлении нормальном к истинному.

Заметим, для получения автокорреляционной функции g для грубой оценки длины смаза L мы используем уравнение (6), однако для оценки угла мы используем несколько иную функцию градиента:

$$|f(x, y)| = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 < \frac{X^2}{4}, \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}, \quad (12)$$

где $[x_0, y_0]$ центр изображения X размер апертуры. Другими словами, мы сохраняем фазу комплексной функции f в уравнении (6) и, в тоже время, устанавливаем значение амплитуды внутри некоторого круга равной единице и нулю вне этого круга. Цель такого предварительного преобразования подавить шум квадратной апертуры изображения и одновременно уравнивать все направления градиентов на изображении. Для точной оценки длины смаза рассмотрим амплитуду смазанного изображения в частотной плоскости:

$$F = |\mathcal{F}\{f\}|, \quad (13)$$

где знак $\mathcal{F}\{\}$ обозначает дискретное преобразование Фурье.

Если функция f искажена смазом с углом ϑ , тогда срез функции F вдоль этого угла ϑ можно аппроксимировать функцией sinc^2 [1] с базовым периодом равным:

$$\rho_T = \frac{X}{M}. \quad (14)$$

Для реальных изображений нули sinc^2 функции становятся локальными минимумами, которые необходимо найти, чтобы оценить длину смаза. К сожалению, подобный метод оценки длины смаза не работает для реальных изображений, и в этой статье мы предлагаем модификацию, с использованием грубой оценки M в уравнении (9), а затем коррекцией:

$$M = \arg \min_{\rho_T} \left(\sum_{0 < k < K} \hat{F}(k\rho_T) \right), \quad (15)$$

где \hat{F} усреднение по нормальному направлению F ; K число возможных минимумов, число которых допускает область определения поиска параметра M : $M_{\text{rough}} - \Delta M < M < M_{\text{rough}} + \Delta M$ при условии $\frac{X}{2} > K\rho_T = \frac{X}{M}$.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В первой части этого раздела представлены результаты сравнения оценок угла и длины смаза движения, полученные с помощью предложенного алгоритма и некоторых известных методов, опубликованных к настоящему времени. Для этой серии экспериментов мы выбрали два "стандартных" тестовых изображения: "Lena" и "Cameraman". Эти изображения подверглись искажениям с некоторыми типичными параметрами смаза. Затем была осуществлена оценка параметров смаза полученных искаженных изображений с помощью некоторых известных алгоритмов и метода, предложенного в данной статье.

В Таблице 1 представлены результаты сравнения оценок угла смаза, а в Таблице 2 — результаты сравнения оценок длины смаза. Нетрудно видеть, что точность работы предложенного алгоритма превосходят оценки других методов.

Таблица 1. Оценка угла смаза движения ϑ .

Изображение	Дано: ϑ	Радон [17]	Rekleitis [18]	Габор [19]	Наш метод
"Lena" ($L = 15$)	$\vartheta = 30^\circ$	$\vartheta_{est} = 29^\circ$	$\vartheta_{est} = 28^\circ$	$\vartheta_{est} = 29^\circ$	$\vartheta_{est} = 30^\circ$
"Cameraman" ($L = 30$)	$\vartheta = 40^\circ$	$\vartheta_{est} = 41^\circ$	$\vartheta_{est} = 43^\circ$	$\vartheta_{est} = 39^\circ$	$\vartheta_{est} = 40^\circ$

Таблица 2. Оценка длины смаза движения L .

Изображение	Дано: L	Радон [11]	Rekleitis [18]	RBFNN [19]	Наш метод
"Lena" ($\vartheta = 30^\circ$)	$L = 15$	$L_{est} = 18$	$L_{est} = 19$	$L_{est} = 14$	$L_{est} = 15$
"Cameraman" ($\vartheta = 40^\circ$)	$L = 30$	$L_{est} = 27$	$L_{est} = 32$	$L_{est} = 29$	$L_{est} = 30$

Во второй части этого раздела представлены результаты восстановления смазанных изображений с помощью предложенного метода реконструкции градиентов (см. раздел 1). Для этой серии экспериментов взяты из базы данных, использованной в статье [16], четыре мультиспектральных изображения: "Виноградник", "Поле", "Переход" и "Аэропорт". Эти исходные тестовые изображения представлены на Рис. 1. Каждое из этих четырёх изображений было искажено оператором смаза с различными значениями длины смаза L и угла смаза ϑ . Значения параметров этих искажений были оценены для каждого канала отдельно с использованием предложенного метода (см. раздел 2).

Результаты оценок параметров смаза даны в Таблице 3. Из этой таблицы видно, что для малых значений длины смаза определение величины и угла в инфракрасном диапазоне определяется с большей погрешностью. Поэтому при оценке параметров смаза были использованы

медианное значение по всем каналам. Полученные результаты демонстрируют более высокое визуальное качество восстановления предложенным методом в сравнении со стандартным методом Винера. В качестве примера, на Рис. 2 представлены результаты восстановления изображений "Аэропорт", смазанных с параметрами $L = 40$ и $\vartheta = 80^\circ$ и восстановленных с использованием классического винеровского фильтра и предложенного метода.



Рис. 1. Мультиспектральные изображения взяты из базы данных, использованной в статье [16]: (а) – "Виноградник"; (б) – "Поле"; (в) – "Переход"; (г) – "Аэропорт". Верхняя часть изображений представляет БИК канал, нижняя часть – КЗС каналы.

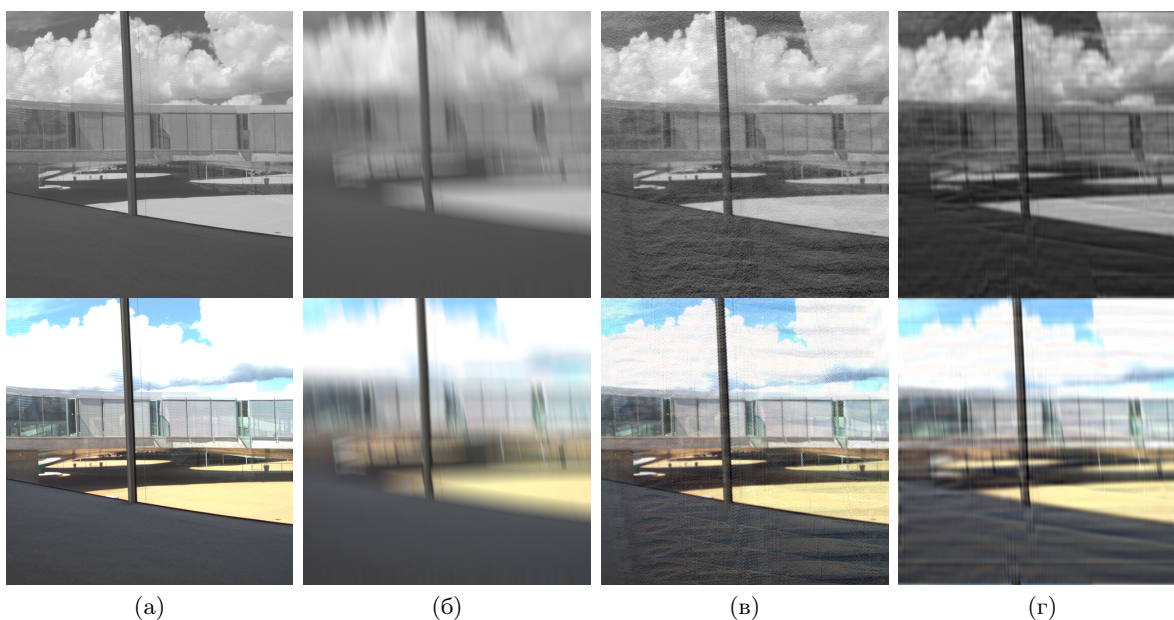


Рис. 2. Иллюстрация восстановления искажённого изображения "Аэропорт": (а) – исходные изображения; (б) – изображения, смазанные с параметрами $L = 40$ и $\vartheta = 80^\circ$; (в) – изображения, восстановленные предложенным методом; (г) – изображения, восстановленные винеровским фильтром.

Таблица 3. Результаты оценки параметров смаза, и сравнение качества восстановления нашего алгоритма и стандартного винеровского фильтра. Качество оценивается по критерию пикового отношения сигнала к шуму в дБ.

Изображение	Искажение		Канал	Оценка		Качество восстановления	
	L	ϑ		L	ϑ	Винер	Наш метод
Виноградник	15	20°	ИК	15.1	19.4°	16.0 dB	31.8 dB
			К	15.0	20.2°		
			З	15.0	20.4°		
			С	15.0	20.6°		
Поле	20	40°	ИК	20.1	40.0°	15.8 dB	31.4 dB
			К	20.1	40.0°		
			З	20.0	39.8°		
			С	20.1	40.0°		
Переход	10	60°	ИК	9.9	60.0°	18.0 dB	33.2 dB
			К	10.1	60.6°		
			З	10.0	60.4°		
			С	10.0	60.4°		
Аэропорт	40	80°	ИК	39.8	80.4°	15.0 dB	27.3 dB
			К	39.9	80.4°		
			З	40.0	80.4°		
			С	40.0	80.4°		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлено два главных достижения – новый алгоритм восстановления смазанных изображений и новый метод оценки параметров смаза движения. Результат восстановления с помощью предложенного алгоритма превосходит стандартный метод на основе винеровской фильтрации. Так же в статье предлагается новый метод оценки параметров искажающего оператора смаза движения. Предложенный метод демонстрирует более точную оценку параметров смаза движения в сравнении с лучшими современными алгоритмами. Кроме того, метод затрачивает на вычисление параметров значительно меньше времени, чем популярные алгоритмы оценки, основанные на преобразовании Радона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yaroslavsky L. Digital holography and digital image processing: principles, methods, algorithms. Springer Science & Business Media, 2013.
2. Yitzhaky Y., Boshusha G., Levy Y., Kopeika N. S. Restoration of an image degraded by vibrations using only a single frame. *Optical engineering*. 2000. Vol. 39, no. 8. P. 2083–2091.
3. Rav-Acha A., Peleg S. Restoration of multiple images with motion blur in different directions. *Applications of Computer Vision, 2000, Fifth IEEE Workshop on. / IEEE*. 2000. P. 22–28.
4. Oliveira J. P., Figueiredo M. A., Bioucas-Dias J. M. Blind estimation of motion blur parameters for image deconvolution. *Pattern Recognition and Image Analysis*. Springer, 2007. P. 604–611.
5. Oliveira J. P., Figueiredo M. A., Bioucas-Dias J. M. Parametric blur estimation for blind restoration of natural images: linear motion and out-of-focus. *Image Processing, IEEE Transactions on*. 2014. Vol. 23, no. 1. P. 466–477.
6. Chochia P., Milukova O. Comparison of two-dimensional variations in the context of the digital image complexity assessment. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2015. Vol. 60, no. 12. P. 1432–1440.
7. Karnaukhov V., Kober V. Blind identification of linear degradation operators in the fourier domain. *SPIE's 60 Annual Meeting, Conference: Applications of Digital Image Processing XXXVIII / SPIE*. Vol. 9599. 2015. P. 95992I–7.

8. 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.
9. 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. 0231011–6.
10. Cannon M. Blind deconvolution of spatially invariant image blurs with phase. *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on*. 1976. Vol. 24, no. 1. P. 58–63.
11. Rekleitis I. M. Steerable filters and cepstral analysis for optical flow calculation from a single blurred image. *Vision Interface*. Vol. 1. 1996. P. 159–166.
12. Freeman W. T., Adelson E. H. The design and use of steerable filters. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*. 1991. no. 9. P. 891–906.
13. Simoncelli E. P., Farid H. Steerable wedge filters for local orientation analysis. *IEEE transactions on Image Processing*. 1996. Vol. 5, no. 9. P. 1377–1382.
14. Toft P. A., Sørensen J. A. The Radon transform-theory and implementation : Ph.D. thesis / Peter Aundal Toft, John Aasted Sørensen ; Technical University of Denmark Danmarks Tekniske Universitet, Department of Informatics and Mathematical Modeling Institut for Informatik og Matematisk Modellering. 1996.
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. Brown M., Süsstrunk S. Multispectral SIFT for scene category recognition. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR11)*. Colorado Springs, 2011. June. P. 177–184.
17. Moghaddam M. E., Jamzad M. Motion blur identification in noisy images using mathematical models and statistical measures. *Pattern recognition*. 2007. Vol. 40, no. 7. P. 1946–1957.
18. Rekleitis I. N. Optical flow recognition from the power spectrum of a single blurred image. *Image Processing, 1996. Proceedings., International Conference on / IEEE*. Vol. 3. 1996. P. 791–794.
19. Dash R., Majhi B. Motion blur parameters estimation for image restoration. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*. 2014. Vol. 125, no. 5. P. 1634–1640.

A gradient recovery restoration of multispectral images corrupted by motion blur and blur parameters estimation based on a multi-target matching model

Karnaukhov V., Mozerov M.

In this paper new method to restore multispectral images based on the corrupted image gradient reconstruction is proposed. This method uses a simple relationship between near and far gradients in the corrupted images. The result of restoration outperforms standard Wiener filter technique. Also a new method to estimate motion blur parameters is presented. This blurred image is considered as a superposition of M shifted images identical to the original non-blurred image. In this case convolution of the blurred image with itself can be considered as M^2 pairwise convolutions which contribute in the resultant autocorrelation function producing a distinguishable line corresponding to the estimated motion blur angle. The proposed method demonstrates the same or even better accuracy of the motion blur angle estimation in comparison with state-of-the-art methods. While our method possesses lower computational complexity than popular accurate methods based on Radon transform.

KEYWORDS: multispectral image restoration, motion blur, motion blur estimation.