



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办：中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
03
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

非真实感图像处理 P437





第20卷第3期（总第227期）

2015年3月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@radi.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@radi.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

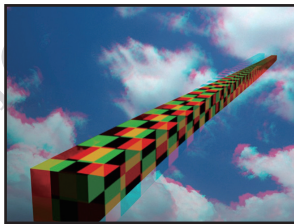
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

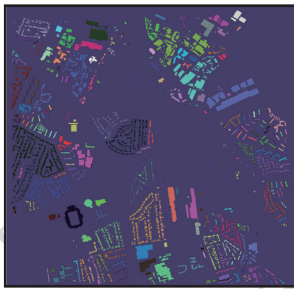
国内定价 50.00元



实时立体视觉系统中的深度映射(第0366页)



基于辐照度的运动模糊图像去模糊(第0395页)



面向智慧城市的3维城市在线可视化(第0445页)

综述

面向血管疾病诊断及预测分析的血流动力学模拟综述

徐梦佳, 杨金柱, 赵宏, 赵大哲 0297

图像处理和编码

多特征融合的车辆阴影消除

邱一川, 张亚英, 刘春梅 0311

图像分析和识别

基于局部时空特征方向加权的人体行为识别

李俊峰, 张飞燕 0320

对表情鲁棒的面部轮廓线3维人脸识别

常朋朋, 达飞鹏, 梅俊 0332

融合双层信息的显著性检测

姜霞霞, 李宗民, 匡振中, 刘玉杰 0340

面向动摄像机的高速运动目标检测

穆春迪, 谢剑斌, 闫玮, 刘通, 李沛秦 0349

匹配滤波在SAR目标单个散射部件检测中的应用

丁柏圆, 文贡坚, 钟金荣, 马聪慧 0357

图像理解和计算机视觉

实时立体视觉系统中的深度映射

李大锦, 白成杰 0366

遥感图像处理

GPU支持的SAR影像几何校正大规模并行处理

杨景辉, 程春泉, 张继贤, 黄国满 0374

基于正则化约束的遥感图像多尺度去模糊

谭海鹏, 曾炫杰, 牛四杰, 陈强, 孙权森 0386

第十届中国计算机图形学大会专栏

基于辐照度的运动模糊图像去模糊

方贤勇, 阚未然, 周健, 李黎, 郭延文 0395

对比度、颜色一致性和灰度像素保持的消色算法

王勋, 罗婷婷, 刘春晓, 彭浩宇 0408

结合因子图的多目的地地图布局优化

罗振珊, 张俊松, 范接鹏 0418

高阶连续的形状可调三角多项式曲线曲面

严兰兰, 韩旭里 0427

改进的自然图像铅笔画效果生成

黄志勇, 姚远, 张晶晶, 马凯, 任东 0437

面向智慧城市的3维城市在线可视化

潘斌, 郭小明, 陈明明, 陈为, 彭群生 0445

CONTENTS

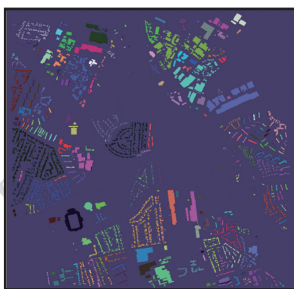
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Depth mapping in real-time stereoscopic systems (P0366)



Deblurring of motion blurred images based on the irradiance(P0395)



Online 3D city visualization for smarter cities(P0445)

Review

Survey of hemodynamics simulation for diagnosis and prediction in vascular disease

Xu Mengjia, Yang Jinzhu, Zhao Hong, Zhao Dazhe 0297

Image Processing and Coding

Vehicle shadow removal with multi-feature fusion

Qiu Yichuan, Zhang Yaying, Liu Chunmei 0311

Image Analysis and Recognition

Human behavior recognition based on directional weighting local space-time features

Li Junfeng, Zhang Feiyan 0320

Expression-robustness 3D face recognition based on facial profiles

Chang Pengpeng, Da Feipeng, Mei Jun 0332

Image saliency detection based on two-layer information fusion

Jiang Xiaxia, Li Zongmin, Kuang Zhenzhong, Liu Yujie 0340

Detecting high-speed moving targets in moving camera environments

Mu Chundi, Xie Jianbin, Yan Wei, Liu Tong, Li Peiqin 0349

The application of matched filter in detecting single scattering parts of SAR targets

Ding Boyuan, Wen Gongjian, Zhong Jinrong, Ma Conghui 0357

Image Understanding and Computer Vision

Depth mapping in real-time stereoscopic systems

Li Dajin, Bai Chengjie 0366

Remote Sensing Image Processing

GPU supported massively parallel processing for geometric correction of SAR imagery

Yang Jinghui, Cheng Chunquan, Zhang Jixian, Huang Guoman 0374

Remote sensing image multi-scale deblurring based on regularization constraint

Tan Haipeng, Zeng Xuanjie, Niu Sijie, Chen Qiang, Sun Quansen 0386

Column of Chinagraph'2014

Deblurring of motion blurred images based on the irradiance

Fang Xianying, Kan Weiran, Zhou Jian, Li Li, Guo Yanwen 0395

Decolorization with contrast, color consistency and grayscale pixel preservation

Wang Xun, Luo Tingting, Liu Chunxiao, Peng Haoyu 0408

Synthesizing multi-destinations map with factor graph

Luo Zhenshan, Zhang Junsong, Fan Jiepeng 0418

Higher-order continuous shape adjustable trigonometric polynomial curve and surface

Yan Lanlan, Han Xuli 0427

Improved algorithm for natural image pencil drawing production

Huang Zhiyong, Yao Yuan, Zhang Jingjing, Ma Kai, Ren Dong 0437

Online 3D city visualization for smarter cities

Pan Bin, Guo Xiaoming, Chen Mingming, Chen Wei, Peng Qunsheng 0445

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)03-0395-13

论文引用格式: Fang X Y, Kan W R, Zhou J, Li L, Guo Y W. Deblurring of motion blurred images based on the irradiance[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(3): 0395-0407. [方贤勇, 阚未然, 周健, 李黎, 郭延文. 基于辐照度的运动模糊图像去模糊[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(3): 0395-0407.][DOI:10.11834/jig.20150311]

基于辐照度的运动模糊图像去模糊

方贤勇^{1,2}, 阚未然¹, 周健¹, 李黎³, 郭延文²

1. 安徽大学计算机科学与技术学院, 合肥 230601; 2. 计算机软件新技术国家重点实验室, 南京 210023;
3. 杭州电子科技大学计算机学院, 杭州 310018

摘要: 已有的图像运动去模糊研究没有考虑模糊实际上发生在辐照度图像中的问题, 也缺少自动检测成块饱和像素的方法。针对这两个问题, 提出基于辐照度的运动模糊图像去模糊方法。**方法** 提出能量累积形成模糊的运动过程与摄像机响应函数相结合的摄像机响应函数求解方法, 以及基于块的饱和像素自动检测算法并在此基础上, 对辐照度图去除运动模糊和亮度还原, 实现清晰原图恢复。**结果** 对单幅图像的定性去模糊取得了比直接去模糊等前人方法更小的振铃, 较好的噪声抑制和清晰图像还原效果; 采用信噪比的定量对比也取得较前人方法更高的数值。**结论** 基于辐照度的方法对图像运动去模糊效率有提升作用。

关键词: 摄像机响应函数; 饱和过程; 辐照度; 运动去模糊

Deblurring of motion blurred images based on the irradiance

Fang Xianrong^{1,2}, Kan Weiran¹, Zhou Jian¹, Li Li³, Guo Yanwen²

1. School of Computer Science and Technology, Anhui University, Hefei 230601, China;
2. State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210023, China;
3. School of Computer Science and Technology, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: Existing motion deblurring methods fail to consider the fact that blurring occurs in irradiance images. Thus, an efficient deblurring method for reducing the effect of naturally appearing saturated pixel blocks remains lacking. To overcome these two limitations, this study proposes an irradiance-based motion deblurring algorithm. **Method** A new estimation method for the camera response function (CRF) that converts irradiance to intensity is proposed. Intensity reflects the energy accumulated during the motion process of capturing the blurred image. A block-based detection algorithm for saturated pixels is presented. This algorithm can automatically detect saturated pixels. The CRF estimation method and saturated pixel detection algorithm are incorporated into the proposed deblurring method to achieve robust irradiance-based motion deblurring without the effect of saturated pixels. **Result** Qualitative experiments for reveal that the proposed method can obtain single-image deblurring obtain latent images more accurately with less ringing and better noise suppression than existing methods. Quantitative experiments return higher peak signal-to-noise ratios than existing methods. **Conclusion** The proposed method and algorithm results are effective for improving motion deblurring performance.

Key words: camera response function; saturation process; irradiance; motion deblurring

收稿日期: 2014-09-02; 修回日期: 2014-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61301295, 61370218, 61003131, 61373059); 安徽省自然科学基金项目 (1408085MF113, 1308085QF100); 南京大学计算机软件新技术国家重点实验室开放基金项目 (KFKT2013B12)

第一作者简介: 方贤勇 (1978—), 男, 教授, 2005 年于浙江大学计算机科学与技术学院获工学博士学位, 主要研究领域为计算机图形学、计算机视觉。E-mail: fangxianrong@ahu.edu.cn

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61301295, 61370218, 61003131, 61373059); Project supported by the Natural Science Foundation of Anhui Province, China (1408085MF113, 1308085QF100)

0 引言

拍摄过程摄像机发生了有意或无意的抖动,就会得到运动模糊的图像。目前的运动去模糊研究多采用模糊核稀疏约束的卷积模型^[1-2]或者运动路径模型^[3-4]等与模糊形成过程直接相关的机制出发研究由摄像设备输出的强度图像的去模糊,还没有从模糊形成之处-辐照度图像(每个像素为其相应的场景辐照度)-出发研究高效的去模糊。另外,拍摄过程中由于饱和过程(SP)的辐照度范围截断约束形成饱和像素(即辐照度被截断的像素)的现象也比较常见。这些像素不具有其他像素的运动模糊特性。目前方法多采用逐像素阈值检测的方法消除饱和像素在去模糊过程中影响^[5-6],但这种方法忽略了饱和像素成块出现的特点,容易造成误检和漏检。上述两个问题也常常同时出现(比如在夜晚或者光照对比很强的场景进行运动拍摄),因而更增加了去模糊的难度。针对这两点不足,研究辐照度基础上的高效图像去模糊算法。提出针对将辐照度转化为强度的摄像机响应函数(CRF)的求解方法,实现运动模糊图像的辐照度图像准确获取。还提出饱和像素基于块的检测算法,达到饱和像素的自动去除。进一步,将CRF求解方法和饱和像素检测算法相结合,提出一种基于辐照度的运动去模糊方法,实现无饱和像素影响的高效运动去模糊。

本文摄像机响应函数研究是在Kim等人^[7-8]关于散焦模糊图像CRF求解的基础上展开的。Kim等人的研究发现CRF影响模糊图像的强度分布。他们指出模糊图边界的截面强度变化曲线和累计函数变化曲线类似,相同方向的边界有相同的截面强度信息,利用同方向边界之间相似的关系,可以求解CRF。这个方法虽取得一定的求解效果,但是也有比较明显的弊病,即需求出一组或者多组同方向的直边界,才可以利用边界相似性这一性质,并且提取的边界数据还需要进一步经人工选择出相类似的部分数据。另外,该方法还停留在传统的全局不变模糊形成的,并没有从运动模糊形成的原理中进行建模,因此并不十分适合运动模糊图像的CRF估计。

本文饱和像素研究是在Cho和Lee^[5]和Whyte等人^[6]饱和图像去模糊的研究基础上展开。Cho和Lee^[5]采用固定的阈值实现无饱和像素的点扩散函

数(PSF)估计,然后对全图所有像素实施不考虑饱和与否去模糊。由于采用固定的阈值,因此容易造成饱和像素没有完全去除或者强度较强的非饱和清晰像素被误去除,因此计算得到的PSF并不准确。同时,由于对全图去模糊不考虑饱和像素的影响,这种方法虽适合多数没有饱和像素的图像,但对存在饱和像素的图像,由于忽略饱和过程的截断特性,因此去模糊的质量难以保证。Whyte等人^[6]则在Cho和Lee^[5]的基础上,对图像提出两种无饱和像素影响的已知模糊核的反卷积方法:一种是直接用一个域值去除饱和像素,另外一种是采用剪切的线性响应函数对饱和过程建模实现平滑过渡,从而达到无饱和像素的去模糊。这两种方法同Cho和Lee方法^[5]的本质一样,均需要依某个阈值检测饱和像素。因此,目前还没有考虑饱和像素的成块分布特征的检测方法。

本文在前人的CRF和饱和图像去模糊研究工作基础上,研究运动模糊图像基于辐照度的去模糊方法。将可以得到辐照度的CRF嵌入到运动模糊形成过程中,得到更加符合运动模糊成像过程的CRF求解方法。该方法也无需同方向边界的要求,克服Kim等人^[7-8]在边界提取方面的限制,实现针对运动模糊图像的更加灵活高效的CRF求解方法以得到辐照度。另外,针对饱和像素对去模糊效果的影响,设计基于块的饱和像素检测方法,实现符合其分布特点的自动检测。进一步,将运动建模的CRF估计方法和基于块的饱和像素检测方法相结合,设计出无饱和像素影响、更加高效的运动去模糊方法。

1 相关工作

运动图像的去模糊研究可以分成两大类:第1类是将运动路径的稀疏性加入到传统空间不变去模糊模型的卷积去模糊方法^[1-2,5,9];第2类是根据将运动模糊图像建模为运动路径上不同位置的场景能量叠加而成的运动路径叠加去模糊方法^[3-4,10-11]。第1类方法实际上并不区分运动模糊与非运动模糊,由于没有针对运动模糊形成过程进行建模,因此取得的运动去模糊效果有限。第2类方法符合运动模糊生成过程中沿路径中不同位置的能量叠加特性,而且一般也考虑了路径稀疏的特点,因此较适合运动去模糊。本文拟采用第2类方法实施去模糊。

但目前此类方法均在强度图像上直接去模糊,没有从模糊图像产生之处(辐照度图像)出发去模糊,因此也不可避免地难以取得理想的去模糊效果。

辐照度可通过对强度图像求解出将辐照度转化成强度的 CRF 获得。当前的 CRF 求解方法较多针对清晰图像。代表性工作之一是 Debevec 和 Malik 的研究^[12]。他们假设 CRF 函数是光滑的曲线,然后对每个像素同时估计辐照度和 CRF 反函数。一些研究者^[13-14]对同一视角在不同曝光时间下获得的多幅图像,运用曝光比计算 CRF。其他的方法还有:通过能获取 RAW 文件的相机拍摄图像计算 CRF^[15];对同一个场景拍摄两幅噪声不同的图,通过两幅图的强度相似度关联求解 CRF^[16];通过灯和纸板创造不同光照环境求解 CRF^[17];针对一幅图利用几何不变性求解 CRF^[18]。CRF 函数本身的表示方面,运用的比较多的是多项式模拟法^[7-8,19],另外也有 EMoR 经验模型^[20]。使用相对比较多的多项式模型建模,通过一幅或者多幅模糊图的边界信息,求解 CRF。

以上方法大多针对的一幅或者多幅清晰图求 CRF,而我们比较关心的是模糊图像特别是运动模糊图像中的 CRF 求解。近期已有少数针对模糊图 CRF 的研究。Chen 等人^[21]通过同一个场景的一幅清晰图和一幅模糊图,运用它们之间的曝光比求解 CRF。Kim 等人^[7-8]利用模糊图边界求解 CRF。他们发现模糊图边界的截面强度变化曲线和累计函数变化曲线是类似的,相同方向的边界有相同的截面强度信息,利用同方向边界之间相似的关系,求得 CRF。这个方法虽取得一定的求解效果,但是也有比较明显的弊病,即需求出一组或者多组同方向的直边界,并对提取的边界数据进一步人工选择出相似的部分数据后,然后利用边界相似性这一性质实现 CRF 求解。另外, Kim 等人^[7-8]研究并不是针对运动模糊图像,因此并没有从模糊形成的运动原因入手进行建模。本文拟对这一思路引入到运动模糊图像的 CRF 求解中,根据运动路径上的能量叠加原理实现一幅或多幅模糊图像的 CRF 建模。本文方法不需要一组相同方向的边界,也不需要边界是直的。所以本文方法在边界的选取上更加灵活。

虽然已有一些研究者注意到饱和像素对去模糊效果的影响^[4,7,22],但是真正针对部分饱和情况下的去模糊研究并不多。较早的工作是通过权系数调节减少饱和像素造成的强度过高现象^[23],但

这种方法没有考虑饱和过程的截止特性与模糊模型连续变化间的冲突,因此难以去除饱和像素的影响。Harmeling 等人^[24]提出在估计出 PSF 后直接给定阈值去除饱和像素的非盲去模糊方法。Cho 和 Lee^[5]和 Whyte 等人^[6]用阈值去除饱和像素实现对 PSF 的估计。由于图像颜色通道的非线性特性,绝对的颜色阈值很难正确区分饱和与否,也因此可能造成部分饱和像素没有去除或者部分清晰像素被去除的现象,进而影响 PSF 估计和非盲去模糊的准确性。针对简单阈值方法的不足, Whyte 等人^[6]还提出在求解 PSF 后的非盲反卷积过程中使用一种剪切响应函数,实现较为平滑的饱和像素去除。但本质上这种方法仍然是人工对像素直接按饱和阈值取舍,因此存在和绝对阈值方法同样的不足。

也有少数研究者研究非绝对阈值的方法。Cho 等人^[25]提出自适应饱和像素去除方法,采用 EM 算法实现饱和像素等异常像素的迭代式去除。这种方法由于饱和像素和噪声统一假设成均匀分布,因此并没有突出饱和像素自身特征,因此取得的效果有效。Vijay 等人^[26]则研究利用多幅图像实现 HDR 重建基础上的去模糊和饱和像素恢复。但是,这种方法需要预先拍摄多种不同曝光程度不同的图像以实现 HDR 成像建模,显然在日常拍摄过程中很难拥有这些图像。可以看出已有方法均是将饱和像素看成孤立的像素进行筛选,忽略了饱和像素在图像中成块出现的特点,因此容易造成饱和像素的误判。为此,提出一种简单高效的基于块的饱和像素识别方法,运用饱和像素不会单独出现的特点,达到饱和像素的自动去除,并进一步与得到辐照度的 CRF 估计方法相结合,实现了一个更加高效的基于辐照度图像的运动去模糊方法。

2 辐照度、饱和过程与运动模糊

目前的去模糊算法多不考虑 CRF 的作用,认为模糊图像 B 是对强度图像 I 的卷积形成,即

$$B = I * K \quad (1)$$

式中, K 表示卷积核。但实际的成像过程却如图 1 所示。其中,场景的辐射度 L 经过摄像机的光学系统线性变换 s 后形成图像辐照度 $\tilde{I}$;然后再经过饱和过程 c 的作用,将辐照度范围截断到最大的辐

照度范围之内,得到受限的辐照度 $\tilde{I}'$;再经过电子器件或者胶片的非线性响应函数 f 转换后变换最终的图像强度 B 。可以看出,导致模糊的光学过程反映在图像辐照度 $\tilde{I}$ 中,而非经过 c 和 f 作用后的最

终 I 中。其中的非线性响应函数 f 就是摄像机响应函数,即 CRF;饱和过程 c 是限制 f 输入辐照度 $\tilde{I}$ 的范围不超过最大辐照度 $\tilde{I}_{\max}$,即

$$c(\tilde{I}) = \min(\tilde{I}, \tilde{I}_{\max}) \equiv \tilde{I}' \quad (2)$$



图1 成像原理

Fig. 1 The imaging principle

进一步,运动模糊图像是对场景辐射度沿运动路径卷积之后再经过饱和过程和非线性响应后得到,即,对于任一坐标为 $x(x, y)$ 的像素,其在模糊图像上的强度 $B(x)$ 为

$$\begin{aligned} B(x) &= f\left(\int_0^T \tilde{I}'(x, t) dt\right) = \\ &= f\left(c\left(\int_0^T \tilde{I}(x, t) dt\right)\right) = \\ &= f\left(c\left(\sum_{i=1}^N \Delta \tilde{I}(x, t_i)\right)\right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\tilde{I}(x, t)$ 表示在 T 成像时间内第 t 时刻 x 的辐照度; $\tilde{I}'(x, t)$ 表示 $\tilde{I}(x, t)$ 经过 c 作用后的辐照度;离散化的 $\Delta \tilde{I}(x, t_i)$ 表示将 T 离散化成 N 个间隔后的第 t_i 个时间间隔内的辐照度。对比式(1)(3)可以看出:目前的运动去模糊算法实际上并不是针对 $f^{-1}(B)$ 实施的,再加上目前算法也没有较好地处理考虑经饱和过程截断后饱和像素的影响,因此不可避免地存在不稳定现象。进一步,要实现更加高效的运动去模糊,就必须在求解 f 的基础上对模糊图像的辐照度图 $f^{-1}(B)$ 执行无饱和像素影响的运动去模糊,这样才能得到更加准确的清晰图像。

由于模糊减少了高频成分,所以模糊差异主要出现在高频高对比度的区域。文献[7-8]的研究指出,CRF 对这些区域的影响大,也即这些区域包含的 CRF 信息较多。因此,要比较准确求解 CRF,就需要选取高频高对比度的区域。边界是高频高对比度区域的代表,因此可以直接选取边界进行 CRF 的估计。由于饱和像素具有较高的强度值,且连续分布,因此可采取基于块的方式自动检测饱和像素以获取饱和区域。

3 运动过程与 CRF 相结合的 CRF 求解模型和方法

根据式(3),如果摄像机和场景对象在曝光时间

内没有相对移动且假设噪声比较小,有 $\Delta \tilde{I}(x, t_1) = \Delta \tilde{I}(x, t_2) = \dots = \Delta \tilde{I}(x, t_N)$, 即 $\tilde{I}(x) = \tilde{N}I(x, t_0) \equiv \tilde{I}_0(x)$ 是一个清晰图。如果发生相对运动,第 t_i 个时刻的成像可以看成由第 $t_i - 1$ 个时刻的成像经单应矩阵 h_i 的投影变换得到,即 $\tilde{I}(x, t_i) = \Delta \tilde{I}(h_i x, t_{i-1})$ 。进一步,如果已知所有的 $h_i (1 \leq i \leq N)$, 那么就可用 $\tilde{I}_0(x)$ 表示所有的 $\Delta \tilde{I}(x, t_i)$, 即

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{I}(x, t_i) &= \Delta \tilde{I}\left(\prod_{j=1}^i h_j x, t_0\right) = \\ &= \frac{1}{N} \tilde{I}_0(H_i x) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, H_i 表示将 $\tilde{I}(x, t_0)$ 变换成 $\tilde{I}(x, t_i)$ 的单应矩阵。这样,忽略饱和过程后,式(3)在考虑摄像机运动路径后就改写成如下运动过程中因不同位置处能量累积而形成模糊的运动模糊模型

$$B(y) = f\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{I}_0(H_i x)\right) \quad (5)$$

如果用 $g(\cdot)$ 表示 f 的反函数,并且用最终得到的强度图像替换式(5)中的辐照度图像 $\tilde{I}$, 那么式(5)就转变成运动过程和 CRF 相结合的运动模糊模型

$$g(B(y)) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(I_0(H_i x)) \quad (6)$$

式中, I_0 表示清晰强度图像。假设已知 I_0, H_i 和 B , 对 B 中的一个像素点 y , 有 $Ng(B(y)) = \sum_{i=1}^N g(I_0(H_i^{-1} y))$ 。选择一块高对比度高强度的边界区域 $\{x, y | x \in [x_l, x_u], y \in [y_l, y_u]\}$ (x_l, y_l 和 x_u, y_u 表示边界在水平 x, y 轴方向上的取值范围,则可以进一步得到目标表达式

$$\arg \min_{g(\cdot)} \sum_{x=x_l}^{x_u} \sum_{y=y_l}^{y_u} \left(Ng(B(x, y)) - \right.$$

$$\sum_{i=1}^N g(I_0(H_i^{-1}(x, y))) \quad (7)$$

根据文献[7,17], g 看做是 d 阶多项式函数

$$g = \sum_{p=0}^d a_p I^p \quad (8)$$

这样, 优化求解式(7)目标表达式的过程就是求解 a_p 的过程。考虑到 $g(0) = 0$ 和 $g(1) = 1$, 可以得到优化求解 g 的模型

$$\begin{aligned} \arg \min_{g(\cdot)} \sum_{x=x_l}^{x_u} \sum_{y=y_l}^{y_u} \left(N \sum_{p=0}^d a_p I(x, y)^p - \right. \\ \left. \sum_{i=1}^N \sum_{p=0}^d a_p I_0(H_i^{-1}(x, y))^p \right) + \\ \lambda \left(a_0^2 + \left(\sum_{p=0}^d (a_p - 1)^2 \right) \right) \quad (9) \end{aligned}$$

上述 CRF 求解模型需要较多的已知量(清晰图像、模糊图像和运动轨迹单应性矩阵), 因此并不实用。由于模糊方向可以通过运动模糊估计^[27]等方法获取, 所认可在模糊方向已知的假设下进行简化计算。

对于一条模糊边界, 如果其两边的图像强度均匀分布, 那么可以从这个模糊边界的形成过程开始简化建模。假设有清晰边界 $[I_s, \dots, I_s, I_L, \dots, I_L]$ 且运动发生在与边界垂直的方向, 此图像的模糊大小为 M , 那么相应的模糊边界是 $[I_s, \dots, I_s, I_1, I_2, \dots, I_M, I_L, \dots, I_L]$ 。不考虑 CRF 的作用, 可得到

$$\begin{cases} I_1 = \underbrace{(I_s + \dots + I_s)}_{M \uparrow} / M = I_s \\ I_2 = \underbrace{(I_s + \dots + I_s + I_L)}_{M-1 \uparrow} / M \\ \vdots \\ I_M = \underbrace{(I_L + \dots + I_L)}_{M \uparrow} / M = I_L \end{cases} \quad (10)$$

在没有 CRF 的作用之下, $[I_1, I_2, \dots, I_M]$ 是一个近似的等差数列。在 CRF 作用下模糊边界变成

$$\begin{cases} g(I_1) = \underbrace{(g(I_s) + \dots + g(I_s))}_{M \uparrow} / M = g(I_s) \\ g(I_2) = \underbrace{(g(I_s) + \dots + g(I_s))}_{M-1 \uparrow} + g(I_L) / M \\ \vdots \\ g(I_M) = \underbrace{(g(I_L) + \dots + g(I_L))}_{M \uparrow} / M = g(I_L) \end{cases} \quad (11)$$

这样, $[g(I_1), g(I_2), \dots, g(I_M)]$ 也是一个近似的等差数列

$$g(I_{m+1}) - g(I_m) = \frac{1}{M}(I_L - I_s) \quad (12)$$

因此, 可计算 CRF, 即

$$\arg \min_{g(\cdot)} \sum_{j=1}^E \sum_{m=1}^{M-2} w_j (g(I_{m+2}) + g(I_m) - 2g(I_{m+1}))^2 \quad (13)$$

式中, E 是选取的边界数目; w_j 是第 j 条边界的强度范围, 也作为一个权值函数; $I_m (1 \leq m \leq M)$ 表示第 j 条边界上第 m 个像素的强度。强度范围大的边界可以提供更多的 CRF 求解的参考。

考虑到 g 的多项式形式(式(8)), 则可以得到式(14)能量最小化形式的 CRF 目标函数, 实现 CRF 反函数系数求解, 也即得到 CRF。

$$\begin{aligned} \arg \min_{g(\cdot)} \sum_{j=1}^E \sum_{m=1}^{M-2} w_j \left(\sum_{p=0}^d a_p (I_{m+2})^p + \right. \\ \left. \sum_{p=0}^d a_p (I_m)^p - 2 \sum_{p=0}^d a_p (I_{m+1})^p \right)^2 + \\ \lambda \left(a_0^2 + \left(\sum_{p=0}^d (a_p - 1)^2 \right) \right) \quad (14) \end{aligned}$$

这一受限非线性优化问题可以采用内点算法^[28]或信赖域反射法^[29]等实现。

4 基于块的饱和像素检测

在自然场景中, 饱和像素常常由于一些发光的物体或者镜面等对光线的反射所引起, 因此饱和像素是实际物体的整体特征表现, 不以单个独立像素的形式出现。观察模糊图像, 也可以发现饱和过程不是表现为单独的饱和像素, 而是一簇簇饱和像素的集合。基于这一原理, 提出基于块的饱和像素检测算法实现饱和像素成块的自动检测。

该算法使用滑动窗口技术结合双阈值实现饱和块的提取。对于图像中每个未检测的像素, 首先判断其是否达到第 1 个饱和阈值。如果超过了, 说明其很可能是一个局部饱和区域中的饱和像素。对于可能的饱和像素, 再以该像素为中心对其周围区域(本文采用 3×3 区域)的强度均值与第 2 个饱和阈值比较。如果均值大于该饱和阈值, 则说明这一区域是饱和块; 否则, 说明检测到的饱和像素并非真正饱和, 从而忽略该像素。具体如算法 1 所示。

算法 1 基于块的饱和像素自动检测

输入: 图像 I , 两个饱和阈值 T_1, T_2 。

输出:饱和像素块构成的掩码图像 I_M 。

```

 $I_M = 1$ ;  $p$  指向第 1 个像素位置;
while  $I_M(p)$  等于 1 do
    读取当前像素的强度  $I_p$ ;
    if  $I_p > T_1$  then
        计算以  $p$  为中心的像素块  $A_p$ 
        强度均值  $I_A$ ;
        if  $I_A > T_2$  then
             $I_M(A_p) = 0$ ;
        else
             $p$  指向下一个像素位置;
        end
    else
         $p$  指向下一个像素位置;
    end
end
end

```

阈值 T_1 着重于首先找到显著的潜在饱和像素,阈值 T_2 则是用于度量以该显著像素为中心的像素块的平均饱和性能,因此 T_1 的取值要比 T_2 大。实验结果表明,通常 T_1 和 T_2 分别取 0.8 和 0.7 可以取得最佳的检测效果。由于逐像素执行阈值对比,因此算法 1 的时间复杂度是线性的,即 $O(n)$ 。

5 基于辐照度估计的高效运动去模糊方法

将上述 CRF 估计方法和饱和像素检测算法相结合,可以将强度图像上的运动去模糊算法拓展到辐照度域的去模糊中,得到基于辐照度的运动去模糊方法。这种新方法的思路是:利用强度图像估计出 CRF,再根据该 CRF 得到辐照度,然后利用饱和像素检测获取辐照度图像中的饱和像素,接着利用现有去模糊算法对辐照度图像实现无饱和像素影响的模糊核估计和准确去模糊,最后根据估计的 CRF 将清晰的辐照度图像映射成强度图像,从而得到最终的清晰原图像。本文以文献[5-6]的去模糊算法为基础,得到如算法 2 所示的方法流程。

算法 2 基于辐照度图像的去模糊

输入:运动模糊图像 B 。

输出:清晰图像 I 。

1) 运用运动过程建模的 CRF 估计方法在提取

少量模糊边界的基础上估计 CRF 反函数;

2) 根据 CRF 反函数计算模糊的辐照度图像 $\tilde{B}'$;

3) 利用基于块的饱和像素检测算法检测 $\tilde{B}'$ 中的饱和像素(算法 1);

4) 运用快速模糊核估计方法(文献[5])计算模糊核;

5) 根据第 4) 步的模糊核,运用不考虑饱和像素的 Richardson-Lucy 去卷积算法(文献[6])计算清晰的辐照度图像 $\tilde{I}$;

6) 根据第 1) 步的 CRF 对 $\tilde{I}$ 进行处理,得到最终的清晰图像 I 。

6 实验结果

在实验中,使用文献[7]实验结果中的第 7 条 Gamma 曲线模拟 CRF,并用水平运动形成的模糊模拟运动模糊。虽然本文方法理想情况下只需一条边界就可实现 CRF 计算,但是为了提高精度和收敛速度,一般选择 3 条左右的较为清晰的直边界。

下面分别从定性和定量两个方面验证本文去模糊算法的效率。

6.1 定性实验

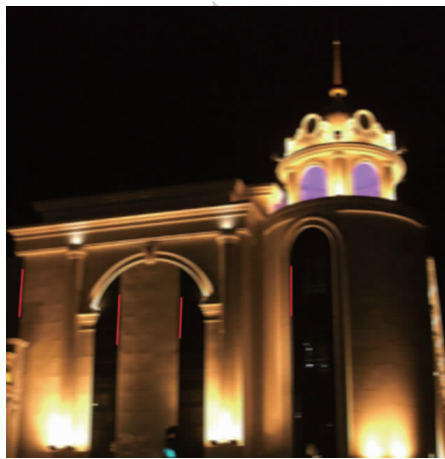
图 2(a) 给出 1 幅运动模糊且存在饱和像素的夜景图像。在选取少量的边界(图 2(a)中的红色线段所示)后,本文基于运动过程建模的 CRF 估计方法就可计算出 CRF 反函数。如图 2(b) 所示,本文得到的 CRF 较 Kim 等人^[8]估计的在绝大多数强度位置上更加接近与原图像的 CRF,整体上更能稳定地逼近原 CRF,因此本文曲线较 Kim 等人方法更有利于准确恢复辐照度。

本文 CRF 估计方法的较稳定特点还在图 3 的去模糊结果中得到反映。这里不考虑饱和像素的影响,而直接对比 CRF 求解后的运动去模糊结果。实验采用文献[1]中的动态去模糊方法,并分 3 种情况进行去模糊结果对比:1) 没有考虑 CRF 作用即直接采用文献[1]的方法;2) 基于 Kim 等人^[8]方法计算出 CRF 反函数下的去模糊结果;3) 基于本文方法得到 CRF 反函数下的去模糊结果。后两种考虑了 CRF 的作用,其去模糊过程是先利用 CRF 的反函数

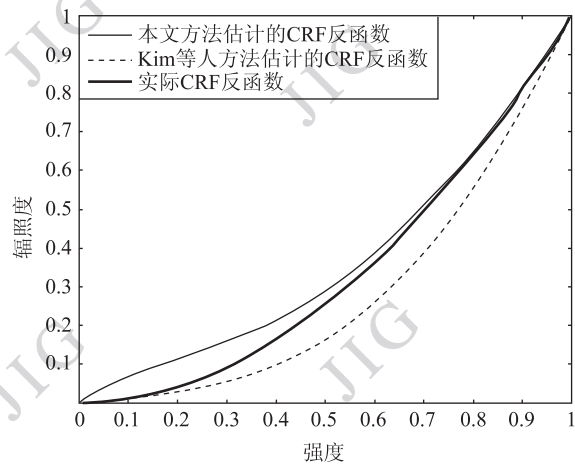
得到辐照度图像,然后对辐照度图像依文献[1]的方法进行去模糊,接着再将CRF的作用加到去模糊后的强度图像上,得到最终的去模糊结果。从图3(c)与图3(a)(b)的对比中可以看出,利用本文CRF估计方法实现的辐照度域去模糊具有最少的振铃,可以得到最光滑的图像。如图2所示,本文CRF较Kim等人的CRF整体上更加稳定地逼近原CRF,在大多数强度位置处更靠近原CRF,因此可以更加准确恢复辐照度图,进而有利于获取更加准确

的去模糊结果。

图4(c)给出对图2(a)采用基于块的饱和像素检测算法得到的饱和像素。与传统的Whyte等人的直接阈值方法相比(图4(a)(b)),其中Whyte等人方法使用了可取得较佳效果的两个阈值进行对比。本文算法具有最少的误检和漏检区域,得到的区域基本覆盖了所有饱和像素。本文方法因考虑饱和区域块状分布特点,因此检测的结果更加准确。



(a) 模糊图像Building红色线段是计算CRF用的边界



(b) CRF计算结果对比

图2 模糊图像 Building 及其 CRF 估计

Fig. 2 The blurred image Building and its estimated CRF



图3 图2(a)考虑CRF与否的去模糊结果对比

Fig. 3 The deblurring result with/without considering CRF for the image shown in Fig. 2(a)

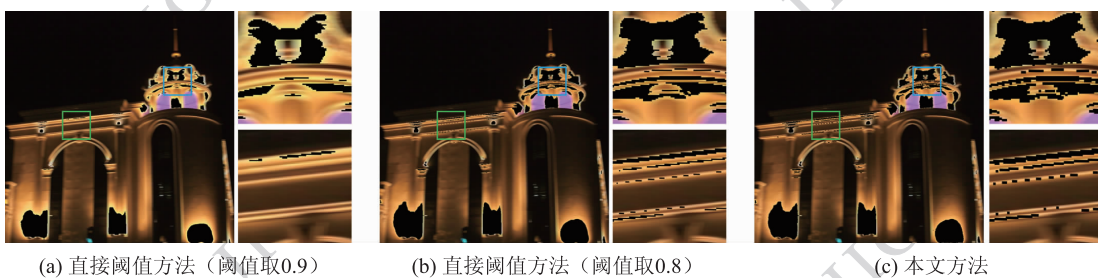


图4 图2(a)的饱和像素检测结果对比

Fig. 4 The saturated pixels detected for the image shown in Fig. 2(a)

图5给出在上述CRF估计和饱和像素计算基础上去模糊结果。为说明本文去模糊方法(算法2)的效率,图5中给出经本文方法估计的CRF和Kim等人方法估计的CRF分别在本文饱和像素和Whyte等人^[6]的两种饱和像素检测方法(直接阈值方法和采用剪切响应函数方法,分别称之为OW1和OW2方法)的去模糊结果。可以看出,在不同的CRF估计方法下,利用基于块的饱和像素的两种去

模糊(最后一行图像所示)取得较采用Whyte等人方法两种饱和像素检测方法更佳的去模糊效果;在所有的去模糊方法中,本文的去模糊方法(右下角的图像所示)相对其他的几种算法得到最小的振铃和噪声,具有最小的不平滑以及噪声放大等问题。本文方法由于获得更加准确的CRF和饱和像素块,因此获得更加准确的辐照度以及更大限度地消除了饱和像素的影响,进而保证了获得更好的去模糊效果。

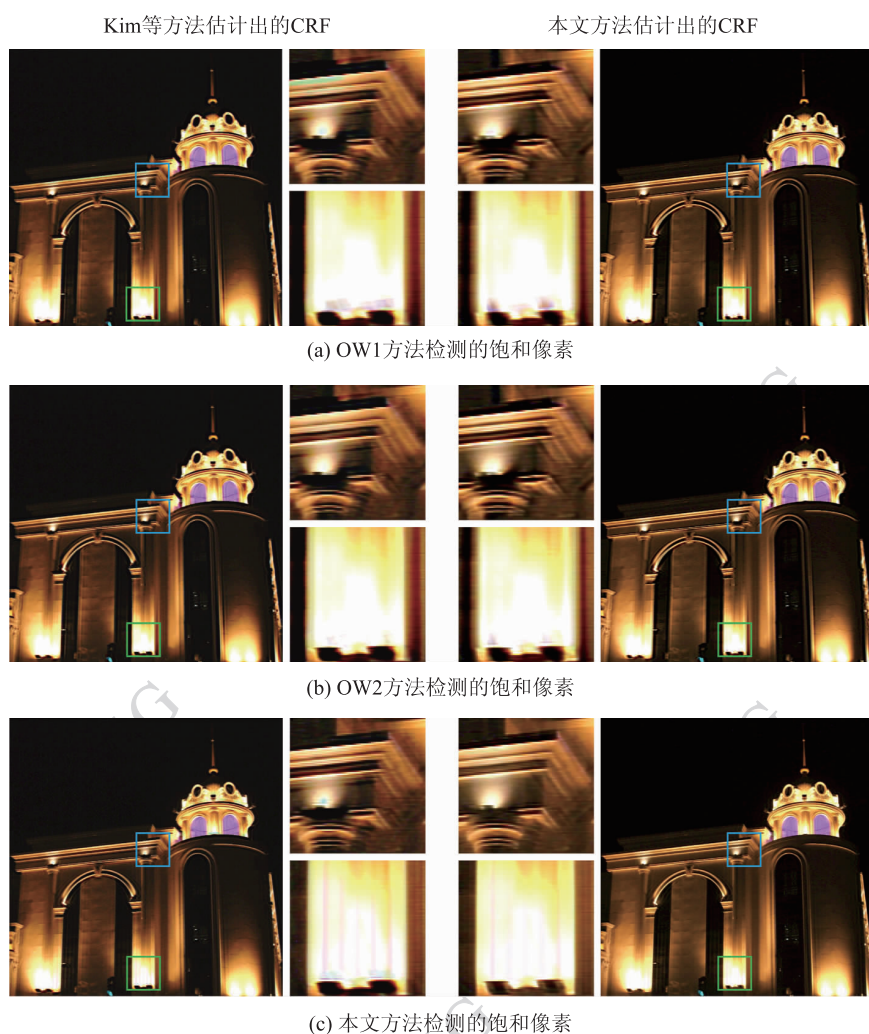


图5 图2(a)基于辐照度之上去模糊的结果对比

Fig. 5 The deblurring result based on irradiance for the image shown in Fig. 2(a)

图6(a)给出另外一幅运动模糊且存在饱和像素的夜景图像。同图2(a)一样,通过选取少量的边界(图6(a)中的红色线段所示),就可以运用本文方法估计其CRF反函数;本文得到的CRF较Kim等估计的在绝大多数强度位置上更加接近与原图像的CRF(图6(b)),在整体上也更逼近原CRF,说明本文方法估计的CRF较Kim等人的CRF更加有利

于获得更准确的辐照度。

同前一幅模糊图像的图3对比实验一样,本文CRF估计结果更准确这一优点也通过相同的无饱和像素的去模糊方法进行对比(图7所示)。从图7(c)与图7(a)(b)的对比中可以看出,辐照度图像域去模糊结果最光滑,具有更少的振铃。本文因获得了更加准确的CRF,因此去模糊效果较Kim等人

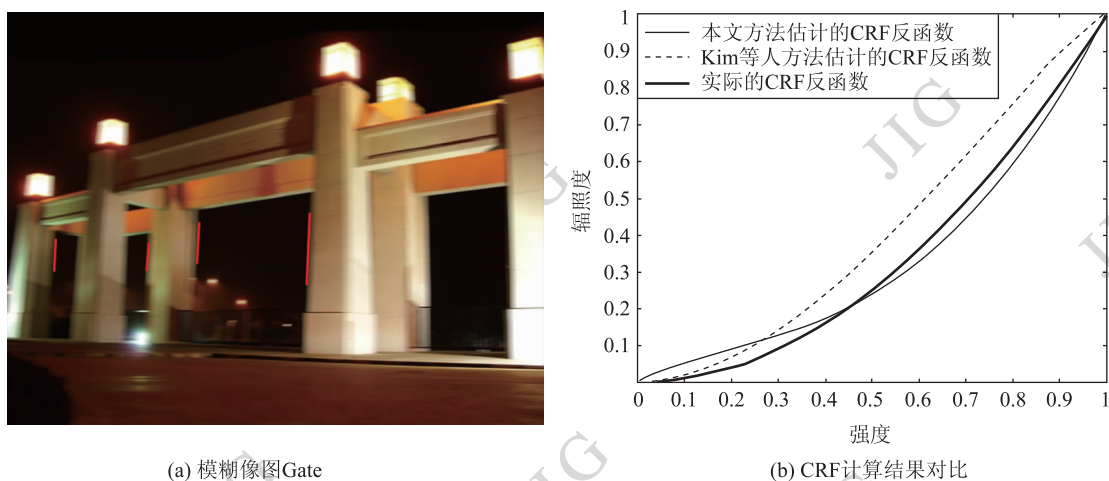


图6 模糊图像 Gate 及其 CRF

Fig. 6 The image Gate and its estimated CRF

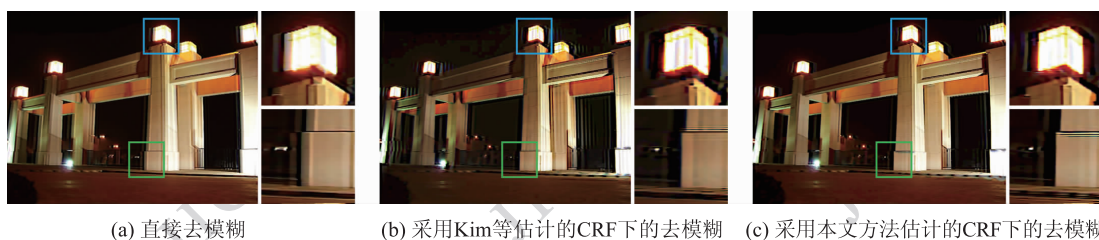


图7 对图6(a)采用考虑 CRF 与否的去模糊结果对比

Fig. 7 The deblurring result with/without considering CRF for the image shown in Fig. 6(a)

方法更佳。

图8(c)给出对图6(a)的饱和像素检测结果。与传统的 Whyte 等人的阈值方法相比(图8(a)(b)),其中 Whyte 等人方法使用和图4一样的可取

得较佳效果的两个阈值进行对比。本文方法由于采取双阈值方法自动检测饱和块,误检和漏检区域较少,得到的区域几乎光滑地覆盖了所有饱和像素,因此取得了较 Whyte 等人更好的检测结果。

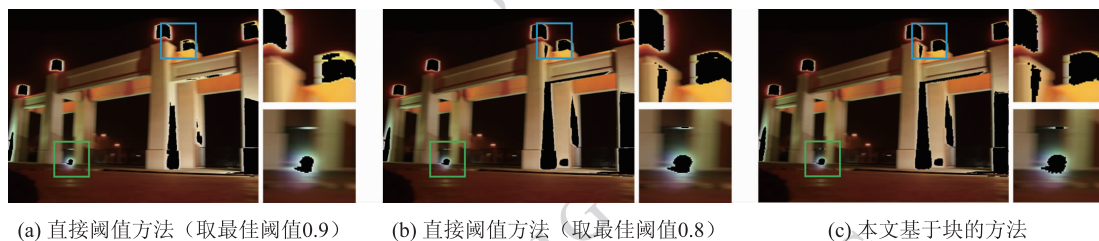


图8 图6(a)的饱和像素检测结果对比

Fig. 8 The saturated pixels detected for the image shown in Fig. 6(a)

图9给出采用图5相同方法的去模糊结果对比。同样可以看出,在不同的 CRF 下,本文的基于块的饱和像素(最后一行图像)均取得最佳的效果;在所有的方方法中,本文的去模糊方法(右下角的图像所示)相对其他的几种方法得到最小的振铃和噪声,具有最小的不平滑以及噪声放大等问题。这些都得益于本文提出的更加准确的 CRF 估计方法和

饱和区域检测方法。

更多的实验结果如图10所示。Kim 等人方法计算 CRF 时需要提供准确高效的平行边界,比较烦琐且通过前述实验已证明计算结果精度通常较本文方法低。这样基于该方法之上的去模糊效果必然难以稳定,因此图10中基于 Kim 等人的 CRF 估计方法之上的去模糊结果就不再列出,而是在图10中给

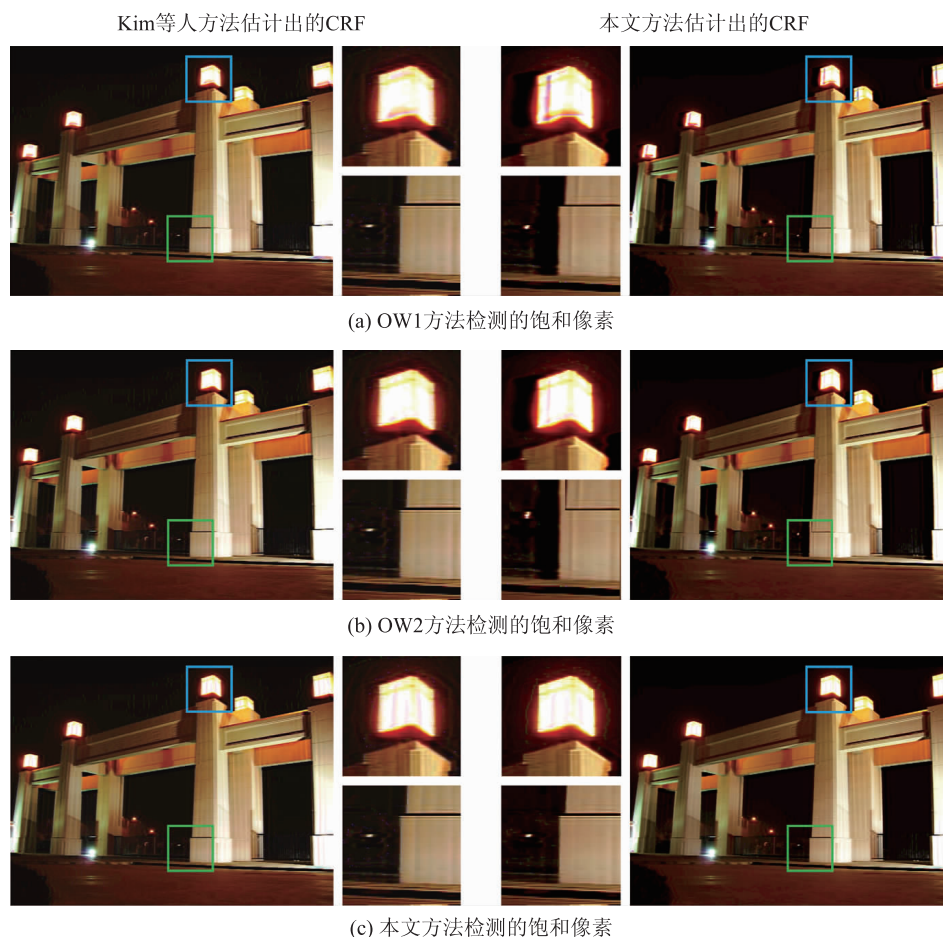


图9 图6(a)基于辐照度之上去模糊的结果对比

Fig. 9 Comparison of the deblurring result based on irradiance

出本文方法与直接去模糊方法结果的对比。可以看出,本文基于辐照度图像的去模糊可以取得较传统方法更加清晰的图像,说明了本文这种从辐照度出发且结合饱和像素准确去除的去模糊算法思想是可行的,具有较高的去模糊效率。

6.2 定量对比

量化实验采用常用的峰值信噪比(PSNR)。它表示信号最大可能功率和影响它表示精度的破坏性噪声功率的比值,可以对图像恢复整体性能进行评价。峰值信噪比越高,恢复得越好。PSNR通过图像像素强度的最大值 Z (本实验中为255)和待比较图像间像素强度的均方误差(MSE)之比取对数后得到,即

$$\text{PSNR} = 20 \cdot \lg \left(\frac{Z}{\sqrt{\text{MSE}}} \right)$$

式中,MSE是在清晰原图的像素强度和去模糊后图像的像素强度之差平方取和运算的基础上再取平均得到。对上述实验中各去模糊方法得到的清晰图像

和原清晰图像进行PSNR计算,结果如表1和表2所示。表1给出Building和Gate的各个去模糊结果(图3、图5、图7和图9)的PSNR对比;表2给出图10的各个图像去模糊结果的PSNR对比。在表1中,1)不考虑饱和像素的去模糊(含直接去模糊)采用Jia等人^[1]的方法;2)考虑饱和像素的去模糊是在算法2的基础上实现;3)KimCRF、OurCRF、NoSP和BSP分别表示Kim等人^[8]的CRF估计方法、本文的CRF估计方法、无饱和像素检测和本文的饱和像素检测方法,由表1可以看出:1)本文方法(OurCRF+BSP)得到的PSNR值最大,说明其性能最好;2)直接去模糊方法得到的PSNR值最小,说明其性能最差。从表1还可以看出,虽然图像Building中基于本文CRF可以取得较Kim等人的CRF取得较大的PSNR,但是对于图像Gate本文CRF取得的PSNR却不全较大,说明不按本文方法2也可以取得一定的去模糊效果。

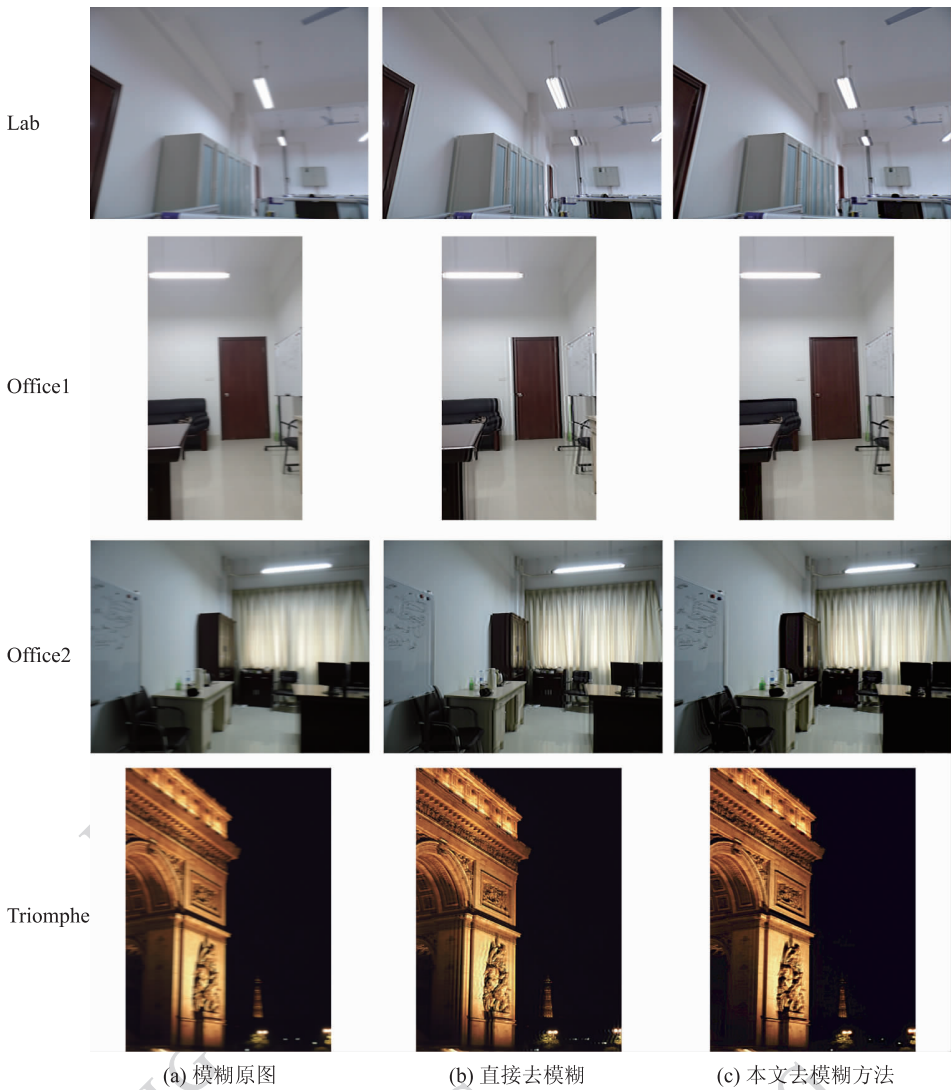


图 10 对 Lab, Office1, Office2, Triomphe 4 幅模糊图像去模糊对比

Fig. 10 Comparison of the deblurring results for the four additional images, Lab, Office1, Office2 and Triomphe

表 1 模糊图像 Building 和 Gate 各个去模糊结果(图 3、图 5、图 7 和图 9)的 PSNR 对比

Table 1 The PSNR values for the deblurred images of Building and Gate

图像	直接去模糊	/dB							
		KimCRF + NoSP	OurCRF + NoSP	KimCRF + OW1	KimCRF + OW2	KimCRF + BSP	OurCRF + OW1	OurCRF + OW2	OurCRF + BSP
Building	18.202 3	22.421 2	25.695 0	23.383 6	23.370 9	24.079 1	24.171 2	24.090 9	26.154 2
Gate	18.470 9	21.442 5	23.284 6	24.694 9	24.785 6	24.651 0	22.203 0	22.529 4	25.033 3

表 2 图 10 中各模糊图像去模糊的 PSNR 对比

Table 2 Comparison of PSNR for the deblurred images shown in Fig. 10

方法	/dB			
	Lab	Office1	Office2	Triomphe
直接	27.130 8	22.896 5	24.119 2	21.362 7
本文	28.121 8	24.519 0	27.083 7	22.953 6

7 结 论

本文针对运动模糊图像,研究 CRF 估计和饱和像素去除在运动模糊图像去模糊中的作用,提出基于辐照度的运动去模糊方法。将 CRF 与运动过程相结合,提出基于运动过程中能量叠加作用的 CRF 求解 CRF 的方法。该方法对 CRF 的求解不要求提

取平行边界,也不需要提取的边界做进一步的人工相似性选择,因此较前人苛刻边界要求之上的CRF估计方法更加灵活简单。利用饱和像素成块出现的特点,提出饱和像素的基于块的自动检测算法。进一步,将CRF求解方法和饱和像素检测算法相结合,提出基于辐照度的运动去模糊方法。实验结果表明本文模型和方法对运动模糊图像可以实现有效的去模糊。

本文不足主要是限定为均匀的运动模糊,而实际的运动模糊并不完全是均匀的运动产生。我们下一步的工作会考虑非均匀的运动模糊以及旋转模糊。进一步工作还将研究其他成像过程因素对模糊的影响,比如色彩空间因素等,以期得到更加鲁棒的运动去模糊算法。

参考文献 (References)

- [1] Xu L, Jia J. Two-phase kernel estimation for robust motion deblurring [C]//Proceedings of the 11th European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2010: 157-170.
- [2] Shan Q, Jia J, Agarwala A. High-quality motion deblurring from a single image [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): #73.
- [3] Nayar S K, Ben-Ezra M. Motion-based motion deblurring [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(6): 689-698.
- [4] Tai Y W, Tan P, Brown M S. Richardson-lucy deblurring for scenes under a projective motion path [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(8): 1603-1618.
- [5] Cho S, Lee S. Fast motion deblurring [J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(5): #145.
- [6] Whyte O, Sivic J, Zisserman A. Deblurring shaken and partially saturated images [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops. Barcelona, Spain: IEEE Press, 2011: 745-752.
- [7] Kim S, Tai Y W, Kim S J, et al. Nonlinear camera response functions and image deblurring [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence, USA, Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2012: 25-32.
- [8] Tai Y W, Chen X, Kim S, et al. Nonlinear camera response functions and image deblurring: theoretical analysis and practice [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(10): 2498-2512.
- [9] Levin A. Blind motion deblurring using image statistics [C]//The Advances in Neural Information Processing Systems. Vancouver, Canada, Cambridge: MIT Press, 2006: 841-848.
- [10] Harmeling S, Michael H, Schölkopf B. Space-variant single-image blind deconvolution for removing camera shake [C]//Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems. Vancouver, Canada: Curran Associates, 2010: 829-837.
- [11] Whyte O, Sivic J, Zisserman A, et al. Non-uniform deblurring for shaken images [J]. International Journal of Computer Vision, 2012, 98(2): 168-186.
- [12] Debevec P E, Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs [C]//Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. Los Angeles, USA: ACM Press, 1997: 369-378.
- [13] Grossberg M D, Nayar S K. Determining the camera response from images: What is knowable? [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(11): 1455-1467.
- [14] Candocia F M, Mandarino D A. A semiparametric model for accurate camera response function modeling and exposure estimation from comparametric data [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(8): 1138-1150.
- [15] Manders C, Mann S. Determining camera response functions from comparagrams of images with their raw datafile counterparts [C]//The International Symposium on Intelligent Multimedia, Video and Speech Processing. Hong Kong, China: IEEE Press, 2004: 418-421.
- [16] Takamatsu J, Matsushita Y, Ikeuchi K. Estimating camera response functions using probabilistic intensity similarity [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, USA, Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2008: 1-8.
- [17] Bichsel M, Ohnesorge K W. How to measure a camera's response curve from scratch [R]. Zurich, Italy: University of Zurich, 1993.
- [18] Ng T T, Chang S F, Tsui M P. Using geometry invariants for camera response function estimation [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Minneapolis, USA: IEEE Computer Society Press, 2007: 1-8.
- [19] Mitsunaga T, Nayar S K. Radiometric self calibration [C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Ft. Collins, USA: IEEE Computer Society Press, 1999: 374-380.
- [20] Grossberg M D, Nayar S K. Modeling the space of camera response functions [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(10): 1272-1282.
- [21] Chen X, Li F, Yang J, et al. A theoretical analysis of camera response functions in image deblurring [C]//Proceedings of the 12th European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2012: 333-346.

- [22] Fergus R, Singh B, Hertzmann A, et al. Removing camera shake from a single photograph[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3):787-794.
- [23] Trimeche M, Paliy D, Vehvilainen M, et al. Multichannel image deblurring of raw color components [C]//*Proceedings of the Electronic Imaging*. San Jose, USA: Society of Photo Optical, 2005: 169-178.
- [24] Harmeling S, Sra S, Hirsch M, et al. Multiframe blind deconvolution, super-resolution, and saturation correction via incremental EM [C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*. Hong Kong, China: IEEE Press, 2010: 3313-3316.
- [25] Cho S, Wang J, Lee S. Handling outliers in nonblind image deconvolution [C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. Barcelona, Spain: IEEE Press, 2011: 495-502.
- [26] Vijay C S, Paramanand C, Rajagopalan A N, et al. Non-uniform deblurring in HDR image reconstruction [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(10):787-794.
- [27] Dai S, Wu Y. Motion from blur [C]//*Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Anchorage, USA: IEEE Computer Society Press, 2008: 1-8.
- [28] Byrd R H, Hribar M E, Nocedal J. An interior point algorithm for large scale nonlinear programming [J]. *SIAM Journal on Optimization*, 1999, 9(4):877-900.
- [29] Coleman T F, Li Y. An interior trust region approach for nonlinear minimization subject to bounds [J]. *SIAM Journal on optimization*, 1996, 6(2):418-445.