

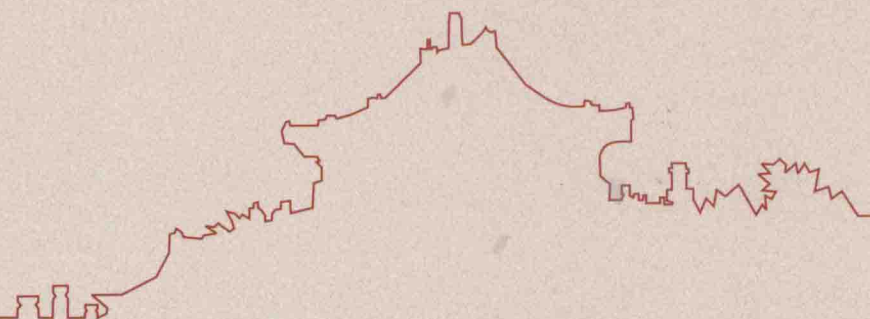
武汉大学优秀博士学位论文文库



多帧影像超分辨率 复原重建关键技术研究

Research on the Key Technologies of Multi-frame Super-resolution Image Reconstruction

谢伟 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

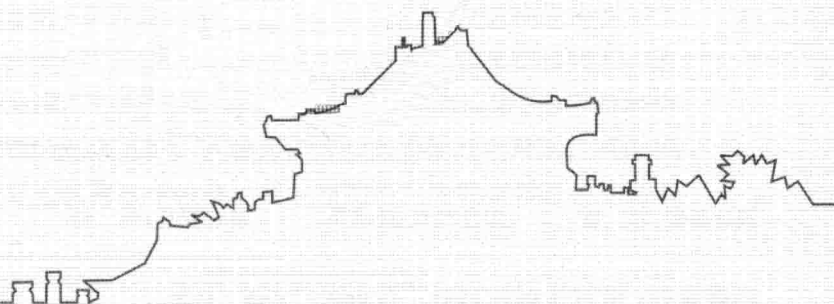
武汉大学优秀博士学位论文文库



多帧影像超分辨率 复原重建关键技术研究

Research on the Key Technologies of Multi-frame Super-resolution Image Reconstruction

谢伟 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

多帧影像超分辨率复原重建关键技术研究/谢伟著. —武汉: 武汉大学出版社, 2014. 1

武汉大学优秀博士学位论文文库

ISBN 978-7-307-12349-6

I. 多… II. 谢… III. 高分辨率图形—研究 IV. TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 312628 号



责任编辑:郭毅

责任校对:汪欣怡

版式设计:马佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷:湖北恒泰印务有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 10.75 字数: 149 千字 插页: 2

版次: 2014 年 1 月第 1 版 2014 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-12349-6 定价: 25.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

总 序

创新是一个民族进步的灵魂，也是中国未来发展的核心驱动力。研究生教育作为教育的最高层次，在培养创新人才中具有决定意义，是国家核心竞争力的重要支撑，是提升国家软实力的重要依托，也是国家综合国力和科学文化水平的重要标志。

武汉大学是一所崇尚学术、自由探索、追求卓越的大学。美丽的珞珈山水不仅可以诗意栖居，更可以陶冶性情、激发灵感。更为重要的是，这里名师荟萃、英才云集，一批又一批优秀学人在这里砥砺学术、传播真理、探索新知。一流的教育资源，先进的教育制度，为优秀博士学位论文的产生提供了肥沃的土壤和适宜的气候条件。

致力于建设高水平的研究型大学，武汉大学素来重视研究生培养，是我国首批成立有研究生院的大学之一，不仅为国家培育了一大批高层次拔尖创新人才，而且产出了一大批高水平科研成果。近年来，学校明确将“质量是生命线”和“创新是主旋律”作为指导研究生教育工作的基本方针，在稳定研究生教育规模的同时，不断推进和深化研究生教育教学改革，使学校的研究生教育质量和知名度不断提升。

博士研究生教育位于研究生教育的最顶端，博士研究生也是学校科学研究的重要力量。一大批优秀博士研究生，在他们学术创作最激情的时期，来到珞珈山下、东湖之滨。珞珈山的浑厚，奠定了他们学术研究的坚实基础；东湖水的灵动，激发了他们学术创新的无限灵感。在每一篇优秀博士学位论文的背后，都有博士研究生们刻苦钻研的身影，更有他们的导师的辛勤汗水。年轻的学者们，犹如在海边拾贝，面对知识与真理的浩瀚海洋，他们在导师的循循善

诱下，细心找寻着、收集着一片片靓丽的贝壳，最终把它们连成一串串闪闪夺目的项链。阳光下的汗水，是他们砥砺创新的注脚；面向太阳的远方，是他们奔跑的方向；导师们的悉心指点，则是他们最值得依赖的臂膀！

博士学位论文是博士生学习活动和研究工作的主要成果，也是学校研究生教育质量的凝结，具有很强的学术性、创造性、规范性和专业性。博士学位论文是一个学者特别是年轻学者踏进学术之门的标志，很多博士学位论文开辟了学术领域的新思想、新观念、新视阈和新境界。

据统计，近几年我校博士研究生所发表的高质量论文占全校高水平论文的一半以上。至今，武汉大学已经培育出 18 篇“全国百篇优秀博士学位论文”，还有数十篇论文获“全国百篇优秀博士学位论文提名奖”，数百篇论文被评为“湖北省优秀博士学位论文”。优秀博士结出的累累硕果，无疑应该为我们好好珍藏，装入思想的宝库，供后学者慢慢汲取其养分，吸收其精华。编辑出版优秀博士学位论文文库，即是这一工作的具体表现。这项工作既是一种文化积累，又能助推这批青年学者更快地成长，更可以为后来者提供一种可资借鉴的范式亦或努力的方向，以鼓励他们勤于学习，善于思考，勇于创新，争取产生数量更多、创新性更强的博士学位论文。

武汉大学即将迎来双甲华诞，学校编辑出版该文库，不仅仅是为百廿武大增光添彩，更重要的是，当岁月无声地滑过 120 个春秋，当我们正大踏步地迈向前方时，我们有必要回首来时的路，我们有必要清晰地审视我们走过的每一个脚印。因为，铭记过去，才能开拓未来。武汉大学深厚的历史底蕴，不仅仅在于珞珈山的一草一木，也不仅仅在于屋檐上那一片片琉璃瓦，更在于珞珈山下的每一位学者和学生。而本文库收录的每一篇优秀博士学位论文，无疑又给珞珈山注入了新鲜的活力。不知不觉地，你看那珞珈山上的树木，仿佛又茂盛了许多！

李晓红

2013 年 10 月于武昌珞珈山

摘 要

自从进入数字成像时代以来,在实际应用需求的驱动下,人们就没有停止过对获取更高分辨率影像的追求。采用影像超分辨率复原重建技术,就可以在不改变现有成像系统硬件的前提下,仅用软件算法的方式从多帧具有互补信息的低分辨率影像序列中重建出更高分辨率的影像。重建的结果不但可以改进影像的主观视觉效果,而且对影像的后续处理,如影像分割、特征提取、识别等各种研究应用都具有十分重要的意义。

本文以光学静态序列影像和视频流影像为主要研究对象,围绕多帧影像超分辨率复原重建的关键技术这一主题展开研究。主要研究工作如下:

1)系统地总结、分析和比较了研究发展过程中形成的主要超分辨率复原重建的理论和方法,并对其数学理论基础进行了分析讨论。针对现有研究对模型的适用条件和应用范围分析不够而导致模型的滥用和重建效果不稳定的问题,建立了基于形变与基于运动模糊这两种降质模型,并提出了基于不同降质模型的重建模型和重建方法框架。

2)针对多帧运动模糊降质影像,提出了序列帧运动模糊参数估计及多帧非线性复原重建的理论与算法。在这一框架下,对于任意方向的运动模糊参数估计问题,提出了基于二维倒频谱分析的算法来高精度地估计 PSF 的参数。为了减少重叠伪影,在详尽地分析产生重叠伪影的各种因素与重叠伪影间的相互关系的基础上,提出了预抑制伪影的基本思路和具体的实践算法。最后提出了抑制重叠伪影的多帧非线性盲复原算法的理论框架和实践算法来提高运动模糊影像的分辨率。

3) 针对不以运动模糊为降质主要因素的多帧(视频流)影像, 提出了基于 Gauss-POCS 模型的多帧序列的盲超分辨率复原重建的理论与算法。对该算法中的几个关键技术进行了研究: 为了获取高精度的影像初始估计值, 提出了保持边缘特性的双边滤波插值算法; 对于运动估计问题, 提出了全局与局部相结合的时空梯度迭代多帧亚像素运动估计算法; 对于重建问题, 以凸集投影作为理论基础, 建立了多种约束算子集和相应的投影操作, 改进了数据一致性约束, 提出了一种重叠伪影的后抑制算法, 并引入多帧联合去噪方法, 最终建立了基于 Gauss-POCS 模型的盲超分辨率复原重建算法, 获取主观视觉效果和客观评价指标均有较大提高的影像。

4) 有效的超分辨率算法评价体系的建立一直是超分辨率研究领域的一个难度较大且富有挑战性的研究难点。为了研究这一问题, 首先对现有的数字影像质量评价方法进行了全面的梳理, 并使用多种指标对高斯模糊和加噪这两种超分辨率研究领域经常要处理的典型的降质类型进行了评价。然后针对超分辨率重建的评价现状进行了分析, 明确了存在的问题。并以此为基础提出了超分辨率复原重建评价体系建立的思路和几个基本原则。最后在这一思路的指导下, 提出了一种针对性强的有效的超分辨率重建中重叠伪影的后抑制和评价算法。

关键词: 超分辨率; 运动模糊; 盲重建; 影像质量评价

Abstract

Since entering the digital imaging era, driven by actual demands, people are never stopping the pursuit for the higher resolution images. If using image super-resolution reconstruction technology, people can reconstruct a higher resolution image from low-resolution image sequence with complementary information by using some algorithms under the situation without changing the existing hardware. The reconstructive results not only can improve the subjective visual effect, but also are significant for the follow-up image processing, such as image segmentation, feature extraction, identification and so on.

In this paper, optical still image sequence and video streaming are used as main object of study. We focus on the key technologies of multi-frame image SR reconstruction. Main research works are shown as follows.

(1) Systematically summarize, analyze and compare the main SR theories and methods which formed in the development of the research field. And its mathematical basis are analyzed and discussed. To solve the problem that abusing the reconstructive models and unstable reconstructive results which is caused by the inadequate analysis about the application conditions and application range of the models, two different models are established that one is based on warping and the other is based on the motion blur, and proposed a reconstruction model and framework based on different degraded models.

(2) For multi-frame motion blur degraded images, a theory and algorithm is proposed for multi-frame estimation for motion-blur

parameters and multi-frame nonlinear reconstruction. Under this framework, for solving the problem that parameter estimation for any direction of motion-blur, an algorithm is proposed that using two-dimensional cepstrum analysis to estimate the parameters of PSF. In order to reduce wraparound artifact, we proposed the basic idea of how to suppress wraparound artifact and specific algorithm to do it based on detailed analysis of the relationship between wraparound artifact and various factors producing it. Finally, for improving the resolution of motion-blur images, a blind multi-frame non-linear reconstruction algorithm and framework is proposed.

(3) For multi-frames (video streaming) that not main degraded by motion blur, the theory and algorithm of blind multi-frame SR reconstruction based on Gauss-POCS model is proposed. Several key technologies have been studied as follow. For obtained high-precision initial estimates, a bilateral filter interpolation algorithm is proposed which can maintain edge features well. For motion estimation problem, we proposed multi-frame subpixel motion-estimation algorithms which use spatio-temporal gradient iterative and combine global model and local model. For solving reconstruction problem, we use POCS as the theoretical basis to establish a variety of constraints and the corresponding projection operations. Data consistency constraints have been improved. A post-suppressed algorithm for wraparound artifact is proposed. Multi-frame joint denoising method is introduced. Finally, we establish a blind SR reconstruction algorithm based on Gauss-POCS model to obtain the image that subjective visual effects and objective assessment are greatly improved.

(4) Establishment of efficient evaluation system for SR algorithm has always been a difficult and challenging research area in SR research. For research this problem, firstly the existing digital image quality evaluation methods are sorted out. And a variety of indicators are used to evaluate Gaussian blur and Gaussian noise which are two typical

degraded types in SR research field. Then, current evaluation situation of SR reconstruction has been analyzed and existing problems has been identified. We proposed some ideas and a few basic principles that establish evaluation system for SR reconstruction based on above analysis. Finally, an effective post- suppressed algorithm and assessment index for wraparound artifact which is produced by SR reconstruction is proposed.

Key words super-resolution; motion blur; blind reconstruction; image quality assessment



武汉大学优秀博士学位论文文库

已出版：

- 基于双耳线索的移动音频编码研究 / 陈水仙 著
- 多帧影像超分辨率复原重建关键技术研究 / 谢伟 著
- Copula函数理论在多变量水文分析计算中的应用研究 / 陈璐 著
- 大型地下洞室群地震响应与结构面控制型围岩稳定研究 / 张雨霏 著
- 迷走神经诱发心房颤动的电生理和离子通道基础研究 / 赵庆彦 著
- 心房颤动的自主神经机制研究 / 鲁志兵 著
- 氧化应激状态下维持黑素小体蛋白低免疫原性的分子机制研究 / 刘小明 著
- 实流形在复流形中的全纯不变量 / 尹万科 著
- MITA介导的细胞抗病毒反应信号转导及其调节机制 / 钟波 著
- 图书馆数字资源选择标准研究 / 唐琼 著
- 年龄结构变动与经济增长：理论模型与政策建议 / 李魁 著
- 积极一般预防理论研究 / 陈金林 著
- 海洋石油开发环境污染法律救济机制研究 / 高翔 著
——以美国墨西哥湾漏油事故和我国渤海湾漏油事故为视角
- 中国共产党人政治忠诚观研究 / 徐霞 著
- 现代汉语属性名词语义特征研究 / 许艳平 著
- 论马克思的时间概念 / 熊进 著
- 晚明江南诗学研究 / 张清河 著

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景和动机	1
1.1.1 数字影像传感器	1
1.1.2 什么是空间分辨率?	3
1.1.3 为什么需要超分辨率复原重建?	4
1.2 影像超分辨率复原重建的概念	5
1.2.1 超分辨率复原重建的基本定义	5
1.2.2 相关影像处理技术与超分辨率复原重建的 联系和区别	6
1.3 超分辨率复原重建的应用	9
1.3.1 应用领域	9
1.3.2 应用实例分析	12
1.4 论文概述	15
第二章 超分辨率复原重建概述	17
2.1 超分辨率复原重建研究的发展历史和现状	17
2.1.1 研究发展历史综述	17
2.1.2 超分辨率研究的类别	21
2.2 超分辨率复原重建的基本理论模型	22
2.3 几种重要的超分辨率复原重建算法	24
2.3.1 傅立叶频域算法	24
2.3.2 非均匀插值(NUI)算法	25
2.3.3 迭代反投影(IBP)算法	26

2.3.4 基于概率理论的算法	28
2.3.5 基于集合理论的算法	30
2.3.6 Delaunay 三角网重建算法	32
2.3.7 算法比较	35
2.4 研究中存在的挑战及未来的发展趋势	36
2.5 本章小结	37
第三章 理论分析和建模	38
3.1 线性移不变系统的降质模型	38
3.1.1 点扩展函数	38
3.1.2 线性移不变系统	40
3.1.3 线性移不变系统下影像降质的一般模型	41
3.2 影像降质因素及典型模糊函数	42
3.2.1 运动模糊	43
3.2.2 散焦模糊	44
3.2.3 大气扰动	45
3.2.4 盒型模糊	45
3.2.5 高斯模糊	45
3.3 逆问题与不适定问题	46
3.3.1 影像重建中的逆问题与不适定问题	46
3.3.2 不适定问题的规整化	47
3.4 基于不同降质模型的超分辨率复原重建	48
3.4.1 基于形变的多帧降质模型	49
3.4.2 基于运动模糊的多帧降质模型	50
3.4.3 重建模型	51
3.5 本章小结	52
第四章 序列帧运动模糊 PSF 参数估计及非线性复原重建	53
4.1 运动模糊建模	53
4.1.1 运动模糊产生的原因	53
4.1.2 运动模糊降质模型	54

4.1.3 运动模糊 PSF 的参数	56
4.2 运动模糊 PSF 估计研究中存在的误区	57
4.3 基于倒频谱的运动模糊 PSF 参数估计	58
4.3.1 倒频谱算法原理	59
4.3.2 运动模糊 PSF 参数估计	61
4.4 多帧运动模糊复原	63
4.4.1 运动模糊的线性复原算法	64
4.4.2 重叠伪影产生原因分析	66
4.4.3 运动模糊引起的重叠伪影的预抑制	70
4.4.4 抑制重叠伪影的多帧非线性盲复原算法	74
4.5 实验及分析	77
4.5.1 实验一：倒频谱估计运动模糊 PSF 参数	77
4.5.2 实验二：多帧抑制重叠伪影的非线性盲复原	79
4.6 本章小结	80
第五章 基于 Gauss-POCS 模型的盲超分辨率复原重建	82
5.1 问题的提出	82
5.2 奇异帧检测	83
5.3 影像的初始估计值	84
5.3.1 双线性插值	84
5.3.2 保持边缘特性的双边滤波插值	86
5.3.3 算法比较	88
5.4 多帧亚像素运动估计	90
5.4.1 Keren 全局运动估计	90
5.4.2 全局与局部相结合的时空梯度迭代运动估计	91
5.5 序列影像盲超分辨率重建	95
5.5.1 POCS 的理论及方法	95
5.5.2 盲超分辨率复原重建	97
5.5.3 重叠伪影的后抑制	101
5.5.4 多帧联合去噪	102
5.5.5 盲超分辨率复原重建能力分析	103

5.6 实验及分析	104
5.6.1 实验一：降质不一致影像序列的超分辨率重建 ..	104
5.6.2 实验二：局部运动视频盲超分辨率重建	105
5.6.3 实验三：标准分辨率测试图卡影像分辨率提升 ..	105
5.6.4 实验四：监控视频影像多帧超分辨率重建	108
5.7 本章小结	111
第六章 超分辨率复原重建影像质量评价	113
6.1 数字影像质量评价方法	113
6.1.1 主观评价方法	113
6.1.2 客观评价方法	115
6.1.3 影像质量评价算法分析与比较	123
6.2 超分辨率复原重建评价的比较与分析	124
6.3 超分辨率复原重建评价体系建立的思路 and 原则	126
6.3.1 超分辨率重建影像的特点	126
6.3.2 超分辨率重建评价研究存在的问题	127
6.3.3 评价体系建立的基本准则	127
6.4 重叠伪影的后抑制与评价	128
6.5 评价实例和分析	129
6.5.1 实验一：重叠伪影的后抑制与评价	129
6.5.2 实验二：多种客观评价指标对重建影像和抑制 重叠伪影影像的综合评价	131
6.6 本章小结	132
第七章 总结和展望	133
7.1 本文工作总结	133
7.2 进一步的研究工作与展望	135
参考文献	136
缩略语表	152
致谢	154

第一章 绪 论

1.1 研究背景和动机

1969 年, 美国贝尔实验室的两位科学家 Boyle 和 Smith 首先发明了 CCD(Charge-Coupled Device, 电荷耦合器件)^[1], 这一伟大的发明标志着数字成像时代的到来。在随后的四十多年时间里, 数字成像设备和处理技术不断高速发展, 很多研究成果逐步从实验室走入人们的日常生活和科学研究的方方面面, 深刻地影响着人们获取信息的方式。自从进入数字成像时代以来, 在实际应用需求的驱动下, 人们就没有停止过对获取更高分辨率影像的追求。影像超分辨率复原重建技术正是在这样一个大的技术和应用需求背景下产生的。

1.1.1 数字影像传感器

数字影像传感器是数字静态影像和视频流获取系统的核心设备, 它是决定影像质量的关键因素, 同时也是研究影像超分辨率复原重建的硬件基础。现在已经比较成熟并占据主流市场的成像传感器主要是 CCD 和 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor, 互补金属氧化物半导体)。

(1) CCD

CCD 由为数众多的光敏单元(微小光电二极管或光电容)及译码寻址电路构成的固态电子感光成像部件组成。CCD 中的光敏单元也被称作“像素”, 数字照相机或摄像机的“像素”通常以平面阵

列的方式排列,其工作原理如同传统胶卷。首先,光敏单元在曝光时间积累一定量的电荷,然后输出这些与入射光成正比的电荷,这些电荷被转移到 CCD 的移位寄存器中,并由其输出到放大处理 MOS 电路,再经过 A/D 转换电路转换成数字影像数据。从成像过程可以看到,成像传感器上光敏单元的多少是决定输出影像空间分辨率的一个重要因素。

(2) CMOS

CMOS 主要是采用硅和锗这两种元素做成的半导体,其工作原理是通过对 NP 互补效应所产生的电流进行记录处理,然后解读成影像数据。和 CCD 一样,CMOS 的尺寸大小影响感光性能的效果,面积越大,感光性能越好,可获取影像的空间分辨率越高。

(3) CCD 和 CMOS 的比较

早于 20 世纪 70 年代,科学家们就开始了 CCD 的研究,经过长期发展,技术成熟,优点明显,现在已广泛应用于数字影像采集的方方面面。而 CMOS 由于太容易出现杂点这一技术瓶颈(这主要是因为早期的设计使 CMOS 在处理快速变化的影像时,由于电流变化过于频繁而会产生过热的现象),在早期发展中并不顺畅,随着技术的改进,高档 CMOS 已经基本消除了此类问题,从 20 世纪末开始,CMOS 得到了较快的发展。

一般而言,从技术角度考虑,CCD 和 CMOS 的比较如表 1-1 所示^[2]。从目前的市场占有率看,CCD 因为技术成熟而占有率较高,但从表 1-1 中可以看出,CMOS 在技术上有很大的潜力。最近几年,CMOS 在商用数字照相机和摄像机领域同时发起了对 CCD 的挑战,尤其是 2008 年以后,佳能等数字成像的顶尖厂家在很多高端的数字采集设备(比如高端单反数字相机)均采用了 CMOS,改变了以往 CMOS 只存在于低端数字相机市场的局面。部分科学家甚至认为,随着 CMOS 的发展,CCD 的优势在逐渐减弱,CMOS 将逐渐取代 CCD 成为未来成像传感器的一个发展方向。更多关于 CCD/CMOS 数字影像传感器的研究可参看文献^[1-3]。