

高新技术专著系列

Image/Video Super Resolution

图像/视频的 超分辨率复原

卓力 王素玉 李晓光 著

- 图像/视频超分辨率复原技术的学术专著
- 相关领域的最新研究进展
- 理论性和实用性的完美统一



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

高新技术专著系列

Image/Video
Super Resolution

图像/视频的
超分辨率复原

卓力 王素玉 李晓光 著

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

图像/视频的超分辨率复原 / 卓力, 王素玉, 李晓光
著. — 北京: 人民邮电出版社, 2011. 1
(高新技术专著系列)
ISBN 978-7-115-24002-6

I. ①图… II. ①卓… ②王… ③李… III. ①数字图
像处理 IV. ①TN911. 73

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第194602号

内 容 提 要

本书是关于图像和视频超分辨率复原技术的一本学术专著, 反映了相关技术领域近年来的最新研究进展。

全书共分 5 篇 19 章。第一篇为基础知识, 介绍数字图像与视频的基本概念、图像插值缩放和质量增强的基本方法以及超分辨率复原的基本概念; 第二篇为基于重建的超分辨率复原, 分析论述了基于重建思想的各种图像超分辨率复原方法; 第三篇为基于学习的超分辨率复原, 阐述了基于学习思想的图像超分辨率复原方法以及人脸图像的超分辨率复原技术; 第四篇为高动态范围图像的显示, 介绍了高亮度动态范围图像在标准显示设备上显示的处理技术; 第五篇为超分辨率复原技术的发展趋势, 主要介绍了当前在超分辨率复原研究领域的一些研究热点。

本书可供通信与电子系统、信号与信息处理、计算机应用等相关专业的研究人员、工程技术人员、高校教师、研究生和高年级本科生学习参考。

高新技术专著系列

图像/视频的超分辨率复原

-
- ◆ 著 卓 力 王素玉 李晓光
责任编辑 杨 凌
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京画中画印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 700×1000 1/16
印张: 23.25 彩插: 2
字数: 434 千字 2011 年 1 月第 1 版
印数: 1-2 500 册 2011 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-24002-6

定价: 88.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

本书的研究工作曾受到国家自然科学基金、国家“863”计划、北京市自然科学基金以及国家“211”工程的资助。

序

近年来，因特网的日益普及，移动通信的迅猛发展，各种多媒体业务（如可视电话、视频会议、高清电视、视频点播、数字图书馆、视频检索、远程医疗以及视频监控等）的涌现，都使图像/视频技术得到了日益广泛的应用。

客观世界的场景含有丰富的信息，通过图像采集系统获取的数字图像受到成像条件和成像方式的限制，难以获取原始场景中的所有信息。采集设备分辨率的限制，会造成图像高频细节信息的丢失。超分辨率复原就是要试图恢复成像过程中已经“丢失”的成像系统截止频率之外的信息，从而改善与提高图像的质量。

超分辨率复原这一思想最早是由 Harris 和 Goodman 于 20 世纪 60 年代提出的，但最初并未得到广泛的认可，直到 80 年代以后才取得了突破性的进展。特别是 1984 年 Tsai 和 Huang 提出一种由低分辨率图像序列复原单帧高分辨率图像的方法之后，超分辨率复原技术开始得到日益广泛的研究，目前已经成为现代图像处理领域的一个重要的研究方向。

超分辨率复原技术的基本思想是采用信号处理的方法，在改善图像质量的同时，重建成像系统截止频率之外的信息，从而在不改变硬件设备的前提下，获取高于成像系统分辨率的图像。作为一种不需要硬件参与的提高图像空间分辨率的方法，超分辨率复原技术利用连续多帧低分辨率图像中不同而又相似的信息，并结合有关先验知识，重建高分辨率图像。因此它的最大优点就是成本低，现有的低分辨率成像系统仍可以使用，特别是能够实现对已获取的大量图像资源的充分利用。

卓力教授所在的北京市信号与信息处理研究室早在 20 世纪 90 年代即对图像/视频超分辨率复原技术开展了研究，并和悉尼大学的 David Dagan Feng 教授、香港理工大学的 Kin Man Lam 博士、诺丁汉大学的 Guoping Qiu 博士进行了长期卓有成效的合作，取得了多项有意义的研究成果。

.....

本书是关于图像/视频超分辨率复原的一本学术专著，作者对这一领域的基础理论和最新研究进展进行了全面的讨论，其中既包括了超分辨率复原技术的理论分析，又从基于重建的方法、基于学习的方法等多个角度对超分辨率复原技术的最新研究进展进行了深入的评述，并进一步对超分辨率复原与高动态范围图像显示技术的融合进行了讨论，指出了今后的发展方向。

在本书即将出版之际，我们不禁深深怀念我国著名的电子学和空间系统科学家、“两弹一星”功勋奖章获得者、“863”计划倡始人之一——中科院院士陈芳允先生。陈先生生前十分关心图像与视频技术的发展，曾多次来室指导工作，参加课题鉴定和学生论文答辩。20 世纪 90 年代初陈先生就对“超分辨率图像恢复”给予了非常关注，指出其潜在的应用前景，有关的情景仿佛还是昨天的事情。我想先生如能知道本书的出版，必将十分欣慰。

沈芳允

于北京工业大学科学楼 830 室

2010 年 8 月 1 日

前 言

图像/视频的超分辨率复原技术是当今信号与信息处理领域一项具有挑战意义的前沿课题。在图像获取过程中，受成像条件和成像方式的限制，成像系统并不能获取原始场景中的所有信息。如何提高图像的空间分辨率，改善图像质量，一直以来都是图像获取技术所致力解决的重要问题。超分辨率复原技术被看作是解决这一问题的一种经济有效的方法。

超分辨率复原技术的基本思想是采用信号处理的方法，重建成像系统截止频率之外的信息，即恢复重建成像过程中所丢失的高频信息，获取高于成像系统分辨率的图像。该技术无需硬件参与，就可以提高图像空间分辨率，因此实现成本低，现有的低分辨率成像系统仍可以使用，也可以充分利用已获取的大量图像资源。目前，超分辨率复原技术在遥感遥测、医学成像、视频监控、数字媒体等诸多领域已得到了初步的应用，并表现出巨大的发展潜力。

超分辨率复原的主流技术包括基于重建的方法和基于学习的方法。基于重建的方法旨在挖掘实际获取的低分辨率图像中潜在的高频信息和多帧图像间的互补信息，并结合图像的先验知识，求解图像降质过程的逆过程，恢复重建成像过程中所“丢失”的高频信息。从早期的频域解混叠开始，到各种基于正则化重建的空域方法，基于重建的技术得到了非常广泛的研究，其间涌现出一批有效的算法。但是，当放大因子增大时，重建约束所能提供的有效信息越来越少，因此基于重建方法的超分辨率复原能力受到很大的制约。

基于学习或基于示例的超分辨率复原则利用了不同图像在高频细节上的相似性，通过学习低分辨率图像和对应高分辨率图像之间的关系来指导图像的超分辨率复原过程。其基本依据是：很多看似不同的图像在高频细节上有很多相似的地方，因此利用样本图像学习得到的高频信息，可以用于其他图

.....

像的超分辨率复原。从高频信息的来源上讲,该类方法强调通过学习过程借鉴示例图像的信息。基于学习的方法对于特定图像如文本、人脸等,在低分辨率图像质量较差、放大倍数较高时取得了很好的效果。

近年来,这两类超分辨率复原技术表现出相互融合的趋势。综合两类算法的特点,实现优势互补,是图像超分辨率复原技术未来发展的一个趋势。

本书是关于图像/视频超分辨率复原的一本学术专著,重点对该领域最新的研究进展进行了全面的讨论,包括传统的基于重建的超分辨率复原技术、当今的研究热点——基于学习的超分辨率复原技术以及最新的研究发展趋势等。全书共 19 章,分为五篇。第一篇:基础知识(第 1~4 章),讨论了图像/视频的基础知识、图像缩放、图像质量增强基本技术以及超分辨率复原技术的发展等内容。第二篇:基于重建的超分辨率复原(第 5~12 章),重点讨论了现有的各种基于重建的超分辨率复原技术。第三篇:基于学习的超分辨率复原(第 13~16 章),重点讨论了最新的基于学习的超分辨率复原技术。第四篇:高动态范围显示(第 17~18 章),讨论了高动态范围图像显示上的研究进展和相关技术。最后一篇探讨了超分辨率复原技术的发展趋势。

本书的内容涉及作者所在的北京市信号与信息处理研究室近十年来的一些科研成果。先后参与这些科研工作的有张新明博士、卓力教授、张晓玲博士、王素玉博士、李晓光博士、乔传标硕士和曹杨硕士等,在此一并表示感谢。

感谢悉尼大学的 David Dagan Feng 教授、香港理工大学的 Kin Man Lam 博士、诺丁汉大学的 Guoping Qiu 博士长期以来在我们开展超分辨率复原研究工作方面给予的指导和帮助。

感谢北京沃克斯技术院的院长杜利民研究员、北京航空航天大学的万江

文教授对本书的大力推荐，并提出了许多宝贵意见，感谢他们给予的帮助。

由于作者水平、时间和精力所限，本书还有不少不尽如人意的地方，尽管我们做了很大的努力，但是缺点和错误在所难免，希望得到读者的批评指正。

卓 力

于北京工业大学综合科技楼

目 录

第一篇 基础知识

第1章 图像/视频基础知识

1.1 图像/视频的数字化表示	3
1.1.1 二维采样定理	3
1.1.2 采样与量化	5
1.1.3 数字图像的数据量与表示	7
1.1.4 视频的数字化	8
1.2 彩色空间	8
1.2.1 彩色空间的视觉属性	8
1.2.2 RGB 彩色空间	9
1.2.3 YCbCr 彩色空间	9
1.2.4 ISH 彩色空间	11
1.3 图像分辨率	12
1.4 图像显示	13
1.5 人眼视觉特性	14
1.5.1 人眼视觉系统的生理特性	14
1.5.2 人眼视觉特性	19
1.6 图像/视频质量评价	24
参考文献	25

第2章 图像缩放

2.1 图像缩放原理	26
2.2 几种传统的图像插值方法	27
2.3 插值方法的对比分析	47
参考文献	48

第3章 图像质量增强基本技术

3.1 概述	50
3.2 图像增强	51
3.2.1 灰度级映射变换	51
3.2.2 直方图变换	53
3.2.3 图像的平滑和去噪	55
3.2.4 图像的锐化	58
3.2.5 频域图像增强	60
3.2.6 同态图像增强方法	64
3.3 图像复原	65
3.3.1 图像退化的数学模型	66
3.3.2 无约束图像复原	68
3.3.3 有约束图像复原	70
参考文献	73

第4章 超分辨率复原技术

4.1 超分辨率复原技术的产生与发展	74
4.2 基于重建的超分辨率复原	75
4.3 基于学习的超分辨率复原	76
参考文献	76

第二篇 基于重建的超分辨率复原

第 5 章

基于重建的图像超分辨率复原技术概述

5.1	概述	81
5.2	超分辨率复原的理论基础	82
5.2.1	观测模型	82
5.2.2	超分辨率复原的数学物理基础	82
5.3	基于重建的超分辨率复原算法概述	86
5.3.1	频域方法	86
5.3.2	空域方法	87
5.3.3	超分辨率复原算法性能评价	92
5.4	讨论	94
	参考文献	94

第 6 章

凸集投影和最大后验概率估计

6.1	概述	97
6.2	运动估计方法	97
6.2.1	块匹配	98
6.2.2	分级块匹配运动估计及可信度验证	99
6.2.3	基于光流的运动估计	100
6.3	凸集投影算法	102
6.3.1	算法原理	102
6.3.2	执行过程	105
6.4	最大后验概率算法	105
6.4.1	算法描述	105
6.4.2	Huber-Markov 先验模型	106
6.4.3	梯度下降最优化方法	108
6.5	算法性能测试与对比	109
6.5.1	模拟低分辨率视频序列	109

6.5.2	实际摄取的低分辨率视频序列	120
6.5.3	实验结果分析与讨论	123
6.6	彩色视频序列的超分辨率复原	124
6.6.1	颜色域分级块匹配运动估计	124
6.6.2	基于 POCS 的算法	126
6.6.3	基于 MAP 的算法	128
6.6.4	实验结果与讨论	129
6.7	讨论	133
	参考文献	134

第 7 章

基于 MRF 模型的 MAP 图像超分辨率复原

7.1	概述	136
7.2	基于自适应 MRF 模型的 MAP 图像超分辨率复原	137
7.2.1	自适应 MRF 模型	137
7.2.2	基于自适应 MRF 模型的 MAP 图像超分辨率复原	141
7.2.3	性能测试与分析	142
7.3	一种基于 MPIFS 和自适应 MRF 模型的 MAP 图像超分辨率复原方法	147
7.3.1	分形编码技术概述	147
7.3.2	基于 MPIFS 的超分辨率复原	149
7.3.3	改进的 MAP 超分辨率复原方法	151
7.3.4	性能测试与分析	152
7.4	讨论	156
	参考文献	156

第 8 章

基于梯度矢量流约束的图像超分辨率复原

8.1	概述	158
8.2	各向异性扩散模型与数字图像处理	159
8.2.1	扩散模型的物理背景	159
8.2.2	平均曲率流扩散模型	159
8.2.3	梯度矢量流场约束的扩散模型	161

8.3 基于梯度矢量流场约束的超分辨率复原算法	162
8.3.1 基于 GVF 约束的超分辨率复原算法	162
8.3.2 基于梯度矢量流场的图像边缘先验知识	163
8.3.3 高斯移动平均模型约束	165
8.3.4 基于梯度矢量流场约束的图像超分辨率复原步骤	166
8.4 性能测试与分析	166
8.5 讨论	169
参考文献	169

第 9 章

基于对象的监控视频超分辨率复原

9.1 基于对象的视频处理技术	172
9.1.1 视频对象的分割	172
9.1.2 视频对象的形状编码	173
9.2 基于对象的超分辨率复原算法框架	174
9.3 视频对象的检测与跟踪	175
9.3.1 背景模型的建立	176
9.3.2 目标检测与跟踪	179
9.4 视频对象的超分辨率复原算法	180
9.4.1 基于仿射模型的多尺度最小二乘块匹配方法	181
9.4.2 基于多尺度仿射块匹配的目标匹配与分割	184
9.4.3 LR 模型约束的 MAP 算法	185
9.5 性能测试与分析	188
9.5.1 目标检测与跟踪	188
9.5.2 多尺度仿射块匹配	191
9.5.3 基于对象的超分辨率复原	193
参考文献	196

第 10 章

基于权值矩阵的超分辨率盲复原

10.1 图像的盲复原技术及其在超分辨率复原中的应用	199
10.1.1 图像盲复原	199
10.1.2 超分辨率盲复原	201

10.2	基于权值矩阵的超分辨率盲复原算法	201
10.2.1	观测模型的建立	202
10.2.2	最大后验概率 (MAP) 框架	203
10.2.3	交替最小化方法	205
10.3	实验结果	206
10.3.1	模拟图像序列测试	206
10.3.2	视频序列测试	209
10.4	讨论	211
	参考文献	212

第 11 章

基于小波变换域的超分辨率复原

11.1	超分辨率问题的小波表征	214
11.2	小波系数的广义高斯模型	216
11.3	基于小波变换域超分辨率复原的求解过程	218
11.4	性能测试与分析	220
11.5	讨论	226
	参考文献	227

第 12 章

基于单帧高分辨率图像的视频序列超分辨率复原

12.1	视频序列的超分辨率复原技术	229
12.1.1	静态批处理方法	230
12.1.2	动态自适应滤波	230
12.2	基于单帧高分辨率图像的视频序列超分辨率复原	231
12.2.1	算法概述	231
12.2.2	运动估计	232
12.2.3	高分辨率视频序列的重建	233
12.3	性能测试与分析	235
12.4	讨论	238
	参考文献	238

第三篇 基于学习的超分辨率复原

第 13 章

基于学习的超分辨率复原技术概述

13.1	概述	243
13.2	基于示例学习的算法	244
13.2.1	算法概述	244
13.2.2	学习模型	245
13.3	基于学习的人脸图像超分辨率复原	247
13.3.1	基于局部特征	247
13.3.2	基于全局特征	248
13.3.3	局部特征与全局特征相结合	249
13.4	讨论	250
	参考文献	250

第 14 章

基于示例学习的超分辨率复原算法

14.1	概述	253
14.2	基于示例学习的超分辨率复原	253
14.2.1	样本库的建立	253
14.2.2	马尔可夫网络模型	254
14.2.3	匹配重建	256
14.2.4	性能测试与分析	257
14.3	基于预分类学习的超分辨率复原	260
14.3.1	算法原理	260
14.3.2	样本的纹理特征	261
14.3.3	基于纹理特征的样本预分类	262
14.3.4	高分辨率图像的生成	263
14.3.5	性能测试与分析	263
14.4	讨论	265
	参考文献	266

第 15 章

基于多类预测器学习的超分辨率复原

15.1	概述	267
15.2	基于多类预测器学习的图像超分辨率复原	268
15.2.1	训练样本的产生	268
15.2.2	基于内容的样本分类	269
15.2.3	多类预测器的设计与训练	270
15.2.4	高分辨率图像的重建	271
15.3	多类预测学习算法性能测试与分析	273
15.3.1	训练样本集和测试图像集	274
15.3.2	自样本训练集	274
15.3.3	特定样本训练集	278
15.3.4	混合样本训练集	279
15.3.5	与分辨率间查找表算法对比实验	280
15.4	讨论	282
	参考文献	282

第 16 章

基于学习的人脸图像超分辨率复原

16.1	概述	284
16.2	人脸的区域特性	285
16.3	基于方向自适应学习的人脸图像超分辨率复原	286
16.3.1	区域方向性分类	287
16.3.2	预测重建	288
16.3.3	性能测试与分析	288
16.4	基于区域分类预测学习的人脸图像超分辨率复原	290
16.4.1	区域内自适应的矢量量化分类	291
16.4.2	预测重建	292
16.4.3	性能测试与分析	292
16.5	讨论	296
	参考文献	296