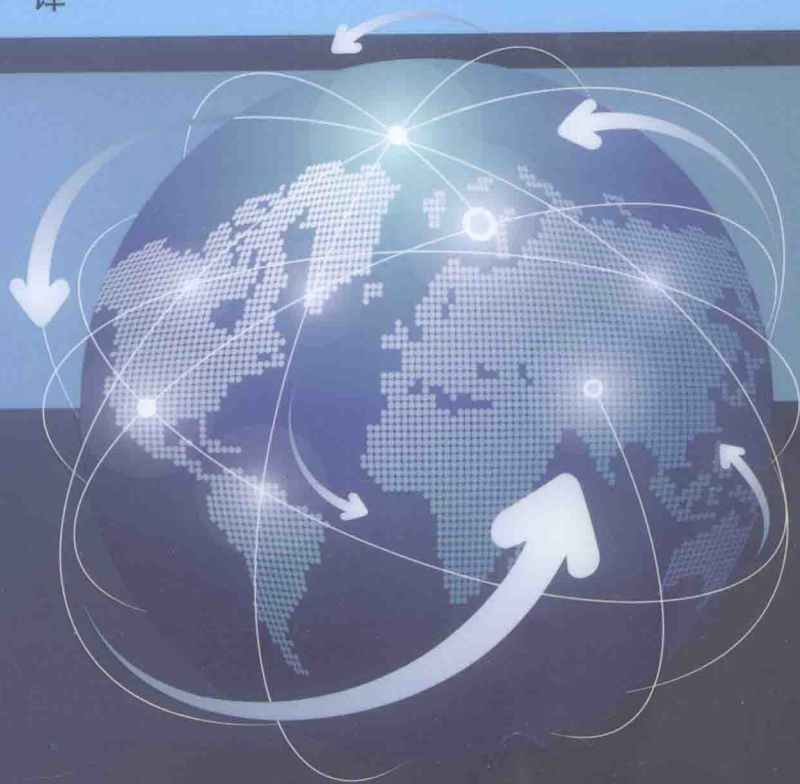


Image Fusion: Algorithms and Applications

图像融合： 算法与应用

[希腊] 谭娜·斯特海琪 (Tania Stathaki) 著
王强 刘燕 金晶 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press

图像融合：算法与应用

[希腊] 谭娜·斯特海琪(Tania Stathaki) 著

王强 刘燕 金晶 译



国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2014-015 号

图书在版编目(CIP)数据

图像融合:算法与应用/(希)斯特海琪(Stathaki,T.)著;
王强,刘燕,金晶译. —北京:国防工业出版社,2015.5
书名原文:Image fusion: algorithms and applications
ISBN 978-7-118-09762-7

I. ①图… II. ①斯… ②王… ③刘… ④金…
III. ①图像处理 IV. ①TP391.41

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第312295号

Image Fusion: Algorithms and Applications by Tania Stathaki Copyright © 2008 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese Translation edition published by Elsevier (Singapore) Pte Ltd, and National Defense Industry Press.

Copyright © 2014 by Elsevier Singapore Pte Ltd. All rights reserved.

Published in China by National Defense Industry Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong, Macau and Taiwan.

Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予国防工业出版社在中国大陆地区(不包括香港、澳门以及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签,无标签者不得销售。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 22¼ 字数 630 千字

2015年5月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 88.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

随着图像采集的数量和方式的增加,现代图像处理系统对图像融合的需求也在不断提高。图像融合被定义为利用数学方法对多个传感器获得的重要信息进行合并的过程,目的是产生一个更易于理解的合成图像,因此这将有损于人工操作或者其他计算机视觉任务。当前的图像传感器可以从所观测场景中提取到不同的信息。通过不同传感器模态采集的图像会表现出不同的特点,如衰减类型、锐化特征、纹理特点等。成像传感器的典型代表有雷达、声纳等声学传感器,红外及热成像照相机,震动、电磁、激光雷达,以及其他类型传感器。在实验科学中,多传感器信息经融合后可以得到增强的表示效果。融合系统的目标是将输入传感器获得的有意义信息自动转移到合成图像中。融合系统也是诸如卫星遥感、医学成像、机器视觉以及车辆和机器人导航等应用中关键的预处理步骤。

本书介绍了图像融合研究领域发展和研究的最新进展,其将推动与图像融合发展相关的多个研究方向的结合。本书阐述了空间域和变换域上的融合方法,如贝叶斯方法、统计方法、ICA 以及小波域上的方法等。另外,本书还包括图像拼接、遥感应用以及性能评估等有价值的材料。书中各章节主要从以下三方面进行重点论述:理论(算法)、设计(结构)和应用。各章节包括图像融合方法的基本理论分析和对现实世界中实际应用的应用,同时也涉及了各种融合方法在实现中遇到的各种相关问题。

为本书做出贡献的作者都是图像融合研究领域杰出的专家。他们提出了这个活跃而又快速发展的科技领域中具有代表性的算法和应用。

本书面向的主要读者是涉及各种图像融合应用的学术和工程研究人员与系统开发者,或需要对这个领域中的研究项目有一个总体概览的项目管理人员。最后,值得指出的是,书中的大部分材料对于参加图像融合及相关领域的课程,或者做有关研究的硕士生或博士生,也是非常具有参考价值的。

内 容 简 介

本书包括图像融合研究领域最新进展的代表性成果,因此也促进了对图像融合发展做出贡献的多种学科间的协作。书中不仅展示了空间域上的融合方法,也包括变换域上的融合算法。本书还包括图像拼接、遥感应用以及性能评估等方面重要的参考资料。书中各章对图像融合的理论、算法设计 and 应用进行了重点论述,内容不仅包括图像融合方法基础的理论分析,也包括这些融合方法在现实应用过程中所遇到的各种相关问题。本书的作者都在图像融合研究领域中取得了领先的研究成果,他们提供了这个活跃而且快速发展的研究领域中具有代表性而且详尽的算法和应用。

目 录

第1章 超分辨率图像重建研究新进展	1
1.1 引言	1
1.2 成像过程建模	2
1.2.1 几何变换模型	2
1.2.2 图像退化模型	3
1.2.3 观测模型——数学模型	5
1.3 最新的超分辨率重构方法	5
1.3.1 频域方法	5
1.3.2 凸集映射	6
1.3.3 贝叶斯/变分法	8
1.3.4 基于插值的方法	9
1.4 超分辨图像重建的鲁棒方法	10
1.4.1 亚像素配准	11
1.4.2 联合贝叶斯配准/重构	11
1.5 实验结果	14
1.6 结论	16
致谢	17
参考文献	17
第2章 基于多分辨过采样分解的图像融合	20
2.1 引言	20
2.2 多分辨分析	22
2.2.1 基本理论	22
2.2.2 非抽取离散小波变换	24
2.2.3 小波变换的多层分解	24
2.2.4 二维图像的平移不变小波分解	26
2.2.5 图像的 à trous 小波分解算法	27
2.2.6 拉普拉斯金字塔	28
2.3 定制调制传递函数的多分辨分析	30
2.4 上下文驱动的多分辨数据融合	31
2.4.1 基于非抽取小波的数据融合方案	32
2.4.2 基于金字塔的数据融合方案	33

2.4.3	$\hat{a}$ trous 小波数据融合方案	34
2.4.4	增强光谱失真最小化模型	34
2.4.5	增强上下文模型	35
2.5	质量评估	36
2.5.1	融合技术的质量评估	36
2.5.2	质量指数	37
2.6	实验结果	38
2.6.1	数据的产生与比较方法	38
2.6.2	基于 QuickBird 数据的性能比较	40
2.6.3	基于 Ikonos 数据的对比结果	44
2.7	结论	46
	致谢	46
	参考文献	46
第3章	基于线性混合模型的多传感器多分辨率图像融合	50
3.1	引言	50
3.2	数据融合和遥感	51
3.3	线性融合模型	52
3.4	案例研究	54
3.4.1	引言	54
3.4.2	研究范围和数据	55
3.4.3	质量评估	55
3.4.4	结果与讨论	56
3.5	结论	60
	参考文献	60
第4章	基于独立成分分析的图像融合方案	63
4.1	引言	63
4.2	ICA 和拓扑 ICA 基	65
4.2.1	基的定义	65
4.2.2	训练 ICA 基	68
4.2.3	独立成分分析基的性质	68
4.3	用 ICA 基进行图像融合	70
4.4	采用 ICA 基的融合规则	71
4.4.1	基于像素的加权组方法	71
4.4.2	基于区域的 ICA 基图像融合	71
4.5	用于图像融合的优化方法	72
4.5.1	拉普拉斯先验概率	72
4.5.2	Verhulstian 先验概率	73
4.6	融合图像的重构	75

4.7 实验	76
4.7.1 实验1:人工畸变图像	77
4.7.2 实验2:离焦图像融合	79
4.7.3 实验3:多模态图像融合	81
4.8 结论	85
致谢	86
参考文献	86
第5章 基于小波域统计建模的图像融合	88
5.1 引言	88
5.2 多模态图像小波系数的统计建模	89
5.2.1 重尾分布	89
5.2.2 小波子带系数建模结果	92
5.3 基于模型的加权平价方法	94
5.3.1 基于梅林变换的显著性估计	94
5.3.2 $S\alpha S$ 随机变量的匹配测度:对称协变系数	97
5.4 结果	97
5.5 结论及展望	99
致谢	100
参考文献	100
第6章 基于 α trous 算法的图像融合理论及其实现	102
6.1 引言	102
6.1.1 基于多分辨率的算法	103
6.2 图像融合算法	103
6.2.1 能量匹配	103
6.2.2 空间细节提取 α trous 算法	104
6.2.3 空间细节注入	105
6.3 结果	109
致谢	111
参考文献	111
第7章 基于贝叶斯理论的图像融合	113
7.1 引言:基于贝叶斯理论的融合方法	113
7.1.1 为什么要进行图像融合?	113
7.1.2 融合方法的三个基本要求	115
7.1.3 为什么研究贝叶斯融合?	116
7.2 直接将贝叶斯定理应用于图像融合问题	117
7.2.1 贝叶斯方法用于解决图像逆问题	117
7.2.2 以高斯分布为例的贝叶斯图像融合	118

7.2.3	贝叶斯估计	120
7.2.4	多阶段模型	121
7.2.5	先验模型	122
7.3	能量泛函法	123
7.3.1	能量项	124
7.3.2	通过吉布斯分布建立与贝叶斯方法的联系	127
7.3.3	和正则化的联系	128
7.3.4	能量最小化	128
7.4	基于 Agent 结构的局部贝叶斯融合	132
7.4.1	局部贝叶斯融合	132
7.4.2	基于 Agent 的结构	132
7.4.3	提出概念的高潜力	134
7.5	总结	134
	参考文献	134
第 8 章	基于图像拼接的多维融合	137
8.1	引言	137
8.2	全景聚焦	139
8.2.1	聚焦基础简介	139
8.2.2	设定像差	141
8.2.3	数据融合	144
8.3	具有高亮度动态范围的全景图	146
8.3.1	图像采集	146
8.3.2	数据融合	148
8.4	视频成像的多光谱宽视域	150
8.5	偏振	152
8.6	结论	154
	致谢	154
	参考文献	154
第 9 章	基于最优化理论的多光谱图像和全色图像的融合	159
9.1	引言	159
9.2	图像融合方法	161
9.2.1	$\hat{a}$ trous 小波变换	161
9.2.2	广义强度-色调-饱和度变换	161
9.3	注入模型和最佳参数计算	162
9.4	泛函优化算法	163
9.4.1	无约束优化	163
9.4.2	遗传算法	166
9.5	质量评估标准	169

9.5.1	Q_4 质量指数	169
9.5.2	合成过程中的无量纲全局相对误差	170
9.6	快速优化算法	170
9.7	实验结果和比较	171
9.8	结论	175
	参考文献	178
第 10 章	基于统计特征优化的图像融合	180
10.1	引言	180
10.2	数学知识预备	181
10.3	基于色散最小融合方法	181
10.3.1	色散最小化融合方法	182
10.3.2	带邻域的色散最小化融合方法	183
10.4	峰度最大化融合方法	184
10.4.1	峰度最小融合方法	186
10.4.2	鲁棒峰度最小化融合方法	186
10.5	实验结果	187
10.5.1	情况 1: 多焦点图像, 轻微失真	188
10.5.2	情况 2: 多焦点图像, 严重失真	190
10.5.3	情况 3: 多传感器图像	193
10.6	结论	196
	参考文献	196
第 11 章	基于统计方法的图像边缘融合	197
11.1	引言	197
11.2	本章所涉及的算子介绍	198
11.3	自动边缘检测	199
11.3.1	ROC 分析	200
11.3.2	加权 Kappa 系数	202
11.3.3	加权 Kappa 系数的几何方法	204
11.3.4	选择参数 r 值的另一种方法	205
11.4	实验结果和讨论	206
11.5	结论	214
	参考文献	214
第 12 章	基于图像融合及盲复原的多传感器图像增强	216
12.1	引言	216
12.2	鲁棒误差估计理论	217
12.2.1	各向同性扩散	218
12.2.2	边缘增强的各向同性扩散	218

12.3	基于误差估计理论的融合	219
12.3.1	一个基于误差估计理论的新融合公式	220
12.3.2	使用误差估计理论的失焦和多模态图像集融合实验	221
12.4	联合图像融合和恢复	223
12.4.1	识别输入图像的公共模糊区域	224
12.4.2	图像恢复	225
12.4.3	联合图像融合和恢复	228
12.4.4	联合图像融合和恢复的实例	228
12.5	结论	234
	致谢	235
	参考文献	235
第13章	基于经验模态分解的图像增强与融合	237
13.1	引言	237
13.2	EMD 和信息融合	238
13.2.1	经验模态分解	238
13.3	图像去噪	239
13.4	纹理分析	242
13.5	阴影去除	243
13.6	多图像模态融合	245
13.7	结论	246
	参考文献	246
第14章	基于区域的多焦点图像融合	248
14.1	引言	248
14.2	空间域上基于区域的多焦点图像融合方法	249
14.2.1	图像分割	249
14.2.2	聚焦测度	249
14.3	采用固定尺寸分块基于空间域的区域融合方法	251
14.3.1	融合方法	251
14.3.2	实验结果	252
14.4	基于分割区域的图像融合	258
14.4.1	基于图像强度分割	258
14.4.2	基于图像清晰度的图像分割	262
14.5	讨论	264
	致谢	264
	参考文献	264
第15章	图像融合技术在无损检测及遥感图像处理中的应用	266
15.1	引言	266

15.2	提出的图像融合技术	267
15.2.1	MKF 算法:如何合并不同尺度的图像	267
15.2.2	PL、FL 和 SL 数据融合技术	270
15.3	基于 MKF 的雷达图像融合	271
15.3.1	数据集描述	271
15.3.2	图像融合 MKF 模型	273
15.3.3	直线检测实验	274
15.4	NDT/NDE 在 FL、PL 和 SL 中的应用	275
15.5	结论	278
	致谢	279
	参考文献	279
第 16 章	遥感应用领域的图像融合	280
16.1	图像融合	280
16.1.1	引言	280
16.1.2	遥感图像的特征	280
16.1.3	分辨率折中	281
16.1.4	PAN 锐化	282
16.1.5	PAN 锐化的应用	283
16.2	PAN 锐化方法	283
16.2.1	强度色调饱和和方法	283
16.2.2	基于多分辨率分析的 PAN 锐化	285
16.2.3	多分辨率理论	286
16.2.4	基于多分辨率的 PAN 锐化	291
16.3	评估指标	294
16.3.1	意义	294
16.3.2	光谱质量指标	294
16.3.3	空间质量指标	295
16.4	基于 MRA 方法的观察	296
16.4.1	叠加法和替代法的比较	296
16.4.2	小波基或滤波内核的效果	298
16.4.3	选择规则的挑选	300
16.4.4	各种 MRA 变换的比较	302
16.4.5	MRA 变换的分解次数	303
16.5	总结	304
	参考文献	304
第 17 章	像素级图像融合方法的性能评价指标	306
17.1	引言	306
17.2	信号级图像融合性能评估	307

17.2.1	信号级图像融合	307
17.2.2	基于边的图像融合算法性能评估框架	308
17.2.3	基于边的图像融合准则	311
17.2.4	可见差异和相关图像融合评价准则	313
17.3	图像融合算法评价准则对比	314
17.3.1	客观评价准则优化	316
17.3.2	融合评价准则的性能	318
17.4	结论	320
	参考文献	320
第 18 章	客观自适应图像融合方法	322
18.1	引言	322
18.2	客观融合估计	323
18.3	客观自适应融合	325
18.3.1	最优静态图像融合	326
18.3.2	最优视频融合	329
18.4	讨论	332
	致谢	332
	参考文献	332
第 19 章	图像融合方法的性能评估	334
19.1	引言	334
19.2	信噪比、峰值信噪比及均方误差	335
19.2.1	实验	336
19.3	互信息、融合因子及融合对称子	337
19.3.1	实验	338
19.4	基于边缘信息的客观指标	339
19.5	融合结构	340
19.5.1	融合结构	340
19.5.2	融合结构对图像融合性能的影响	341
19.5.3	实验	343
19.6	具有多输入的融合方法	344
19.6.1	非线性相关系数	344
19.6.2	非线性相关信息熵	345
19.6.3	信息偏差分析	346
19.6.4	NCA 和 IDA 上的实验	347
19.6.5	讨论	350
	致谢	350
	参考文献	350

第1章 超分辨率图像重建研究新进展

Antonis Katartzis and Maria Petrou

Communication and Signal Processing Group, Department of Electrical and Electronic
Engineering, Imperial College, London, UK

超分辨率重构(Super-resolution Reconstruction, SR)是图像融合中实现带宽外推的一个分支,使用该方法可突破传统电子成像系统的限制。本章将介绍超分辨率重建方法的基本原理,全面分析总结该领域具有代表性的方法。通过分析各种方法的优缺点,提出基于归一化卷积(Normalised Convolution, NC)和鲁棒贝叶斯估计(Robust Bayesian Estimation)的超分辨率重建方法。然后,基于大量的真实视频数据进行了定量和定性比较。

1.1 引言

超分辨率重构是将一系列拍摄于同一场景的低分辨率图像进行融合以生成高分辨率图像的过程。在经典的单帧图像重建/复原方法的基础上,超分辨率重构同时利用多个源图像信息得到比源图像更高的分辨率效果。这些低分辨率的源图像可能是单个或者多个相机在同一时刻或在不同时刻对同一场景拍摄获得的。超分辨率重构也称作多帧超分辨率重构(Multiframe Super-resolution Reconstruction),首先,需要将观测的源图像配准到一个高分辨率的参考图像上,而后,在考虑缺失数据的情况下,可以将图像融合问题描述为一个有约束的图像重构问题。

常见的超分辨率重构策略主要包括以下三个步骤^[1]:

- (1) 低分辨率图像获取:对于同一场景进行低分辨率图像的采集,而且要求任意两幅图像之间以非整数几何偏移(即小于一个像素间距的偏移)进行拍摄。
- (2) 图像配准/运动补偿:相对于高分辨率图像,估计每个源图像的亚像元的几何变换。
- (3) 高分辨率图像重构:利用从多个源图像处获得的信息生成一个高分辨率图像。

Papoulis^[2]提出的广义采样定理(Generalized Sampling Theorem)为超分辨率重构奠定了理论基础。该定理表明对于一个连续的有限带宽信号 $z(\mathbf{x})$,可以用 $z(\mathbf{x})$ 与满足一定条件的滤波器进行卷积后的采样点重构出来。但是,如果滤波器不能满足特定的条件,重构问题就无法完成,例如:如果这些滤波器滤掉了部分高频信号,那么就无法重建原信号了^[3]。这也是使超分辨率重构问题成为一个病态问题的原因之一。通常,病态问题无法满足Hadamard对解存在、解唯一和解稳定的要求,即解对于所有数据而言可能不存在,解可能不唯一(这可能引起通常所说的可辨识性的问题,即数据信息是否足够用来确定未知量),以及在考虑数据扰动的情况下,解可能不稳定。解的稳定性是一个非常重要的问题,因为真实的测量值存在固有噪声,所以重构只能在这种噪声环境下进行。一般为了推导出一个确定的解,我们会针对真实物理环境做先验假设。然而,正如文献[4]所述,高分辨率图像重构的质量有一个上限,这个上

限取决于所应用的低分辨率图像的退化度(Degree of Degradation)。

本章介绍超分辨率重构的基本原理,同时对这个领域内最具有代表性的方法进行全面介绍与总结。在分析了每一种方法的优点与缺点之后,创新性地提出了应用归一化卷积和鲁棒贝叶斯估计方法解决超分辨率重构的问题。本章的主要内容安排如下:1.2节从图像获取的角度给出超分辨率重构问题的数学模型。1.3节介绍现有的超分辨率重构方法。1.4节探讨并提出关于超分辨率重构的新方法。1.5节给出在大量真实视频数据上应用新方法所得到的超分辨率重构结果,同时还对不同方法之间的超分辨率重构结果进行了比较。最后在1.6节进行了归纳与总结。

1.2 成像过程建模

建立高分辨率图像和低分辨率图像之间的关系的模型是解决超分辨率重构问题的基础。低分辨率图像可以看做是理想的高分辨率图像经过几何失真(Geometrically Distorted)及退化(Degraded)得到的。根据低分辨率图像和高分辨率图像之间的关系,需要建立两个模型:第一个是建立低分辨率图像网格和设计好的表示目标高分辨率图像的网格之间的几何变换模型;第二个是在图像获取过程中对图像的退化过程进行建模。假设目标高分辨率图像是利用一个真实的相机拍摄得到的,那么低分辨率图像就可以想象成是高分辨率图像在某些不理想的成像条件下产生的,不理想成像条件可以是运动模糊,噪声影响或者是屏幕采样频率下降。下面几个小节将详细介绍能够描述高分辨率图像和低分辨率图像关系的模型。

1.2.1 几何变换模型

完成低分辨率图像与高分辨率图像的高精度配准是超分辨率重构算法成功与否的关键,因为配准的精度将在很大程度上决定整个重构算法的性能。图像配准在图像分析领域中^[5,6]广泛使用,因此本章对图像配准未进行深入研究,只是简介了图像配准方法的基本原理。

图像配准的目标是确定局部或者全局几何变换 T ,在这个几何变换下,在当前图像坐标系下的坐标 $\mathbf{x} = [x, y]^T$ 将被映射到参考图像坐标系下的坐标 $\mathbf{x}' = [x', y']^T$:

$$\mathbf{x}' = T(\mathbf{x})$$

变换 T 是在评价两幅图像的相似度准则下,使得两幅图像相似度最小的变换。相似度可以是:

- (1) 归一化互相关^[6];
- (2) 强度差的均方值(光流约束)^[7];
- (3) 互信息^[9](注:对于多模态和多图像两种不同形式下的超分辨率重构,基于互信息的图像配准方法更多地应用于前者^[8])。

根据几何变换 T 的不同形式,可以将图像配准方法分为参数化方法(全局)和非参数化方法(局部)。

1.2.1.1 全局参数化方法

在这种方法中, T 可以用一组未知参数明确地表示,因此 T 有解析形式^[10]。在超分辨率重构中,两个常用的、也是具有代表性的参数变换模型是:

- 仿射变换

6个参数的仿射变换模型为

$$T(x) = Ax + b, \quad A \in \mathbb{R}^{2 \times 2}, b \in \mathbb{R}^2 \quad (1.1)$$

该模型包含了旋转、平移和尺度拉伸,同时直线和平行线在此变换下仍为直线和平行线。这种模型可以用在多视图图像配准(Multiview Registration)中,并假设相机到拍摄物之间的距离和拍摄物的尺寸相比较,相机是理想的针孔相机,拍摄物是平的,此时两幅图像之间的几何变换没有其他局部参数变换,仅仅是全局变换。

• 透射变换

如果相机和拍摄物之间的距离不是无穷远,那么 T 将是一个 8 参数的透射变换,即

$$T(x) = \frac{Ax + b}{c^T x + 1} - x, \quad A \in \mathbb{R}^{2 \times 2}, b, c \in \mathbb{R}^2 \quad (1.2)$$

这个模型精确描述了针孔相机光轴不垂直于拍摄物平面时发生的形变。在这个模型下,一个常规的四边形被映射成一个矩形,同时映射前如果是直线,映射后仍然保持为直线。透射模型能够描述通常情况下的四边形变形,同时仿射变换也是透射变换的一种特殊情况。

1.2.1.2 局部非参数化方法

局部非参数化方法不对描述图像形变的全局参数模型做任何假设,而是直接对每一个像素的运动向量进行识别。识别的过程可概括为:首先,应用上面曾提到过的三种描述相似度的方法之一计算两幅图像之间的差异;其次,计算使这个差异最小化时的参数。局部非参数方法的计算复杂度比较高,但是却能够描述出非刚体的和弹性的几何形变特征。Shen 等人在文章^[13]中提出利用多个独立的运动物体来重建超分辨率场景的方法,其中物体的运动是利用分段运动过程来进行估计的。

1.2.2 图像退化模型

1.2.2.1 模糊

引起图像模糊的原因可分为三类:

(1) 相机模糊。它主要从以下两个方面引起图像退化:①成像光学设计不完善;②成像传感器的分辨率较低,由它的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)给出。这两种因素决定了相机的点扩散方程(Point Spread Function, PSF)。

众所周知,光学设计问题产生的是离焦图像模糊^[14],这类模糊主要是由于相机将场景中的一个点源成像为光斑而造成的。但是产生这种效果的全部因素目前还没有定论(可能是焦距的问题、相机孔径的大小和形状等)。目前,可用几种模型近似描述 PSF,包括:

• 均匀离焦模糊(Uniform out-of-focus Blurring)模型。这个模型会把出现在一些成像系统中的离焦模糊部分描述成圆盘内的均匀强度分布:

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi r^2}, & \text{如果 } \sqrt{x^2 + y^2} \leq r \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (1.3)$$

• 均匀二维模糊(Uniform 2D Blurring)模型。这个模型更加接近离焦模糊模型,被广泛应用在很多研究中:

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{R^2}, & \text{如果 } -\frac{R}{2} < x, y < \frac{R}{2} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (1.4)$$

(2) 大气散射。这一点在遥感成像中尤其明显,可表示为高斯 PSF:

$$h(x, y) = K e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (1.5)$$

式中: K 为归一化常量,它保证 PSF 的积分是 1; σ^2 为方差,决定模糊的严重程度。

(3) 运动模糊。相机的快门速度如果比运动速度慢,则会出现这种模糊。一般情况下,可用一维均匀分布表示,取周围像素的局部平均值。例如,水平运动可以表示为

$$h(x) = \begin{cases} \frac{1}{R}, & \text{如果 } -\frac{R}{2} < x < \frac{R}{2} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (1.6)$$

文献[15]介绍了考虑运动模糊的超分辨率重构技术。

也可以用一个能够包含上述三种图像退化因素的核函数来描述退化过程,通过与该低通核函数做卷积的方式对图像模糊进行建模,那么图像模糊矩阵可用这种形式近似: $H = H_{\text{cam}} H_{\text{atm}} H_{\text{motion}}$, 其中矩阵 H 可以表示线性平移不变 (Linear Shift-Invariant, LSI) 模糊,也可以是线性平移变化 (Linear Shift-Varing, LSV) 的模糊过程。

还有一些估计 PSF 的方法用到了相机制造信息 (通常情况下, 这些信息很难获得), 或者是利用已知物体拍摄的图像进行退化模型分析^[16,17], 如分析黑背景上的白点。只根据源图像, 而不考虑图像退化因素的超分辨率重构技术称为盲超分辨率重构技术 (Blind Super Resolution), 它属于广泛研究的盲反卷积 (Blind Deconvolution) 技术的一种, 其中文献[18]是一篇很好的关于盲反卷积技术的综述。现存的盲反卷积技术可大致分为以下两类:

- (1) 把模糊识别当做与超分辨率重构无关的独立过程;
- (2) 同步处理模糊识别和超分辨率重构问题。

盲反卷积技术可以用来解决很多问题。多图像盲反卷积技术能够很好地减少噪声和抑制边缘伪像, 可以防止 PSF 收敛到小 δ 方程。文献[19]提出, 利用多个低分辨率图像, 通过寻找连续图像的相关能量谱极值来估计光学传递函数 (Optical Transfer Function)。还有用最大期望的方法^[20,21]来寻找参数的最大似然估计。另外还有广义交叉验证 (Generalised Cross Validation, GCV) 方法^[22], 这类方法基于图像和模糊参数空间上复原残差最小化来解决模糊参数估计问题, 文献[23]将该类方法应用到了超分辨率重构问题上。

1.2.2.2 空间采样

超分辨率重建建模和经典的图像复原/重建建模的重要区别是子带采样。在超分辨率重建的框架下, 低分辨率图像的每个像素都可以认为是高分辨率图像像素的均值。文献[24]指出, 这个过程类似于用 CCD 相机对一个表面区域进行拍摄时光强的空间累积。另一种对 D 取平均的方法是均匀下采样, 如图 1.1 所示。

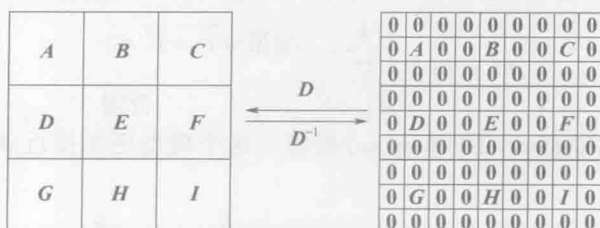


图 1.1 上采样矩阵 D^{-1} 在一个 3×3 的图像上的采样结果和下采样矩阵 D 在一个 9×9 的图像上的采样结果