



计算机视觉丛书

国家自然科学基金资助出版

Image Priors Modeling Based Super-resolution
Theory and Algorithms

基于图像先验建模的 超分辨率增强理论与算法

——变分PDE、稀疏正则化与贝叶斯方法

肖亮 韦志辉 邵文泽 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

国家自然科学基金资助出版

基于图像先验建模的 超分辨增强理论与算法

——变分 PDE、稀疏正则化与贝叶斯方法

肖亮 韦志辉 邵文泽 等著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

图像和视频超分辨率作为当前计算机视觉中经典且充满活力的研究领域,越来越彰显其巨大的应用潜力。其与国际前沿的图像表示理论和先验建模方法紧密关联,成为前瞻性研究课题。

本书系统地阐述了图像超分辨率作为反问题建模的基础理论、关键技术与算法基础及变分正则化、稀疏表示和贝叶斯推理等主流建模方法,并介绍了系列高效数值优化方法。本书通过大量的应用实例,将理论和实践有机地结合,深入浅出地介绍了若干超分辨率与增强的算法专题。

本书可以作为图像处理和计算机视觉领域研究人员的专业参考书,也可作为本科高年级学生和研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

基于图像先验建模的超分辨率增强理论与算法:变分PDE、稀疏正则化与贝叶斯方法 / 肖亮等著. —北京:国防工业出版社, 2017.7

ISBN 978-7-118-11312-9

I. ①基… II. ①肖… III. ①数字图像处理-研究

IV. ①TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 166466 号

※

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)

三河市德鑫印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 插页 8 印张 24½ 字数 565 千字

2017 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 80.00 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

提高图像的分辨率和视觉质量不仅是光学和物理领域的重要科学问题,同时也是数学反问题研究的重要研究方向,更是图像处理和计算机视觉领域的基础性问题。

超分辨成像的“硬件方法”在精密光学领域一直探索超越光学衍射极限分辨率的超高分辨成像技术,并引起了成像探测领域的重要变革。尽管如此,在军事探测、遥感、医学、公共安全监控等大量应用领域,设计新型的成像系统或改进现有成像硬件来提高分辨率,不仅成本高而且需要增大相对孔径等。因为在系统成像、传输和存储过程中固有的退化特性,所以其获取的观测图像不可避免地存在诸如运动变形、光学模糊、欠采样频谱混叠、随机噪声污染等各种降质。如何采取信号处理的“软件方法”提升图像分辨率和视觉质量非常具有理论意义和应用前景。

正是基于上述应用问题的驱动,本书着重于探讨提升图像分辨率和视觉质量的“软件方法”,这种软件方法可以由低分辨率退化图像(或多幅图像、序列)重建一幅(或序列)高分辨率清晰图像,被誉为第二代复原技术。

从信号处理的角度,超分辨率重建需要综合考虑运动估计或配准、去混叠插值放大、去模糊和去噪等多个图像处理任务,是极具挑战性的计算机视觉问题。从数学的角度看,图像超分辨率重建是 Hardward 意义下的非适定数学反问题,因此成为计算数学等多学科领域众多研究者所关注的热点问题。

目前,图像超分辨的研究涉及多学科的交叉,并取得了许多研究成果,一些新的发展和成果如颗颗沧海遗珠,散落在上千篇文献。本书第1篇集中阐述图像建模理论基础。该部分撰写过程中,我们力图将这些沧海遗珠串联起来,揭示图像超分辨数学建模的基本机理。那么,依靠什么将其连成一条主线呢?我们充分注意到,正是由于图像超分辨过程补充信息不足和数学问题的欠定性,在过去提出的大量算法中折射着一个基本认知,即建立兼顾“简洁性”和“结构性”的高效图像表示和先验模型至关重要。“如无必要,勿增实体”,图像简洁而有效表示本质上是“奥卡姆剃刀”原理的体现。从贝叶斯概率推理来看,由缺失和污染的观测数据空间到潜在数据空间,需要架起一座桥梁,而先验模型是这座桥梁的基石。从反问题处理的正则化观点来看,合理的先验模型(或正则化项)有助于缩小候选解的求解空间。这样,我们通过图像先验建模这样一条主线,将一些代表性方法背后的机理作相对系统的阐述。

本书第1篇(第1~4章)集中论述图像超分辨建模基础。这一部分的工作体现在本书的第一部分(第1~4章)。在这些章节中,我们将系统地看到图像超分辨的历史研究脉络(第1章)、观测模型的建立(第2章)、代表性建模体系(第3章)和代表性先验建模方法(第4章)。我们深信这样的安排有助于该领域的研究者能够抓住图像超分辨的本源科学问题,而不会在众多算法中迷失。

本书第2篇(第5~8章)集中论述了超分辨算法基础与关键技术。撰写采用的另一个观点是“分而治之”。如前所述,现有图像超分辨重建的算法涉及大量优化模型,如各类光滑性

正则化模型、稀疏正则化模型等。而图像超分辨问题涵盖运动估计或配准、去混叠插值放大、去模糊等多个图像处理关键技术。本书在第2篇分别对这些关键问题进行了论述。值得指出的是,本书在第5章以简要的形式概述了邻近分裂算法,并着重总结了其在稀疏性正则化和TV正则化问题的高效数值算法及其变种。第6章总结了图像配准和运动估计的基本模型,这些模型充分体现了先验正则化的魅力。第7章总结了图像去模糊的基本模型。第8章回顾了图像插值的基本理论。我们认为图像去模糊是超分辨最为难以处理的问题之一,其原因是实际中的大量图片模糊降质原因是部分未知甚至是完全未知的。我们针对线性卷积模糊,给出了基本的建模思路。归于目前先进的图像稀疏表示和正则化方法,对于图像去模糊的经典问题重新焕发新的活力。例如Adobe公司的PhotoShop Cs7集成了相机抖动去模糊的插件,这个令人惊艳的技术背后的机理便是稀疏正则化的方法。我们给出的方法同样可以达到与其媲美的程度。然而也应该指出,盲去模糊还远远不能消除很多复杂光照环境下的图片模糊,其本质原因是线性卷积只能覆盖模糊原因很小的部分。尽管如此,我们坚信这个问题终有一天能得到较好的解决。

本书第3篇(第9~15章)集中介绍了若干超分辨与增强的算法专题,整理了我们在图像超分辨和增强方面的一些工作。之所以遴选这些工作,是因为我们觉得它们体现了本书的主旨——基于先验的建模。并且采取的手段是多样的,例如第9章集中体现了结构保持的变分偏微分方程在图像插值中的建模思想;第10章体现了基于MAP-MRF的图像超分辨重建的建模问题;第11章是TV正则化在图像超分辨重建的应用;第12章是集中稀疏正则化方法;第13章是变分贝叶斯方法;最后在第14和第15章讨论了图像增强的变分贝叶斯和正则化方法。

应该指出的是:图像超分辨作为信号处理的应用科学问题,目前集中了世界上很多顶级的工程科学家、计算数学家、统计学家参与其中,很多中国大陆和境外华人学者在该领域做出了非常卓越的工作。本书正是站在这些卓越科学家的肩膀上展开的。特别是关于本书的第一篇和第二篇,正是对于这些卓越科学家思想的系统总结。但是,我们并不是简单重复和罗列他人的工作,而是以我们对于该领域的认知,以我们的视角将其有机地串联,涉及的数学理论相当坚深,涉及的算法十分庞杂。对于图像处理工程师,我们避免纠结于这些高深的数学理论及其推导证明过程,而是以图像工程和图像理解的视角对这些内容进行新的表述,当然我们希望本书的表述并没有丧失这些理论的严谨性。

本书集中了课题组多位年轻学者和博士生的研究工作,是群体智慧的结晶。参与本书撰写的工作人员均是课题组毕业或者尚未毕业的博士,包括:邵文泽博士、张军博士、黄丽丽博士(第11章),孙玉宝博士(第12章)、王力谦博士(第14、15章)、傅绪加博士(5.7节);课题组其他博士研究生,如王凯、唐松泽、刘鹏飞、沈煜等参与了本书素材的前期准备工作。本书由肖亮教授负责撰写了第1~第6章、第7章前4节、第8章,邵文泽博士撰写了第7、第9、第10和第13章的主体内容,全书由肖亮和韦志辉同志负责策划、统稿、整理和审校工作。

本书的出版得到国家自然科学基金[61171165, 61571230, 1431015, 61071146, 61402239]和江苏省自然科学基金[BK20130868]、江苏省六大人才高峰和333工程的资助,同时得到江苏省研究生教育教学改革研究与实践课题[JGZZ14-018]资助,在此表示衷心谢意。

同时本书的出版也得到了江苏省社会安全与图像理解重点实验室开放课题的资助,一些算法已经集成研制开发,并应用于实际。我们要感谢教育部高维信息智能感知与系统重点实验室、江苏省社会安全与图像理解重点实验室各位同仁,包括杨健教授、唐振民教授等。

最后,感谢国防工业出版社友好合作,感谢国防工业出版社编辑们在加工和修订方面付出了巨大的努力!

本书不仅涉及图像和信号处理的内容,同时有许多数学模型和数学工具,我们并不能完全理解该领域的所有内容,加之新理论、新模型、新方法层出不穷,并非本书所能涵盖。本书的撰写过程非常艰辛,耗时达三年之久,历经整理—撰写—整理—加工—修订等诸多过程,三易其稿,终成此书。虽然如此,由于著者知识水平有限,但恐仍有不妥之处,还请读者和专家批评斧正。

南京理工大学计算机科学与工程学院
教育部高维信息智能感知与系统重点实验室
江苏省社会安全与图像理解重点实验室
肖亮

目 录

第 1 篇 图像超分辨建模基础

第 1 章 导论	3
1.1 分辨率的基础概念	3
1.2 超分辨重建问题	5
1.2.1 超分辨问题的提出	5
1.2.2 从信息处理角度看超分辨重建的复杂性	7
1.3 超分辨率重建的三类方法体系	8
1.3.1 硬件方法	8
1.3.2 软件方法	9
1.3.3 软硬件结合方法	11
1.4 基于软件方法的超分辨重建的研究动态	12
1.4.1 多幅图像超分辨方法	12
1.4.2 单幅图像超分辨方法	19
1.5 存在的关键问题和研究展望	23
1.6 本章小结	25
参考文献	25
第 2 章 图像退化过程与超分辨观测模型	31
2.1 引言	31
2.2 图像模糊降质过程	31
2.2.1 图像模糊降质基本描述	31
2.2.2 常用模糊模型	32
2.2.3 相机抖动模糊	35
2.3 常用噪声模型	35
2.3.1 加性噪声	36
2.3.2 非加性噪声	38
2.4 一般的低分辨率图像生成模型	40
2.4.1 变形—模糊模型	40
2.4.2 模糊—变形模型	42
2.5 本章小结	42
参考文献	42
第 3 章 图像超分辨的代表性建模方法	44
3.1 引言	44

3.2	超分辨率重建的观测模型分析	44
3.3	图像超分辨重建的代表性建模方法	46
3.3.1	超分辨率重建:光滑性正则化	46
3.3.2	超分辨率重建:稀疏性正则化	47
3.3.3	超分辨率重建:最大似然与最大后验	48
3.3.4	超分辨率重建:完全贝叶斯推理	50
3.4	本章小结	56
	参考文献	56
第4章	图像超分辨建模基础:图像先验	58
4.1	引言	58
4.2	图像建模的国内外研究现状评述	58
4.2.1	变分 PDE 图像模型日新月异	58
4.2.2	稀疏表示方兴未艾	60
4.2.3	形态分量分析倍受关注	62
4.2.4	统计模型经久不衰	63
4.3	正则性(光滑性)先验	64
4.3.1	Tikhonov 正则化先验	65
4.3.2	全变差先验和有界变差函数空间	65
4.3.3	图像先验模型:由 TV 到一般的梯度正则化	67
4.3.4	图像先验模型:由低阶到高阶	70
4.3.5	图像先验模型:由整数阶到分数阶	72
4.3.6	几何图像模型:偏微分方程与结构张量	74
4.4	稀疏性表示与稀疏先验	77
4.4.1	稀疏表示基本原理	77
4.4.2	由小波到多尺度几何分析	82
4.4.3	稀疏分解	87
4.4.4	字典学习	91
4.4.5	稀疏性度量比较	96
4.5	本章小结	98
	参考文献	99

第2篇 超分辨算法基础与关键技术

第5章	超分辨算法基础:高效优化算法	107
5.1	引言	107
5.2	符号和数学背景	108
5.2.1	凸分析基础	108
5.2.2	凸集投影到邻近算子	109
5.2.3	邻近算子的性质	110

5.3	两个目标函数情形的邻近分裂算法	110
5.3.1	前向—后向分裂	110
5.3.2	Douglas – Rachford 分裂	112
5.4	含线性变换的复合问题的邻近算子分裂	113
5.4.1	邻近算子分裂法	114
5.4.2	交替方向乘子法(ADMM)	114
5.5	多个目标函数情形的邻近分裂算法	115
5.6	应用:稀疏性正则化线性反问题	117
5.6.1	典型模型	117
5.6.2	凸稀疏惩罚项及其邻近算子	118
5.6.3	复合仿射算子保真项的邻近算子	119
5.6.4	稀疏性正则化线性反问题的邻近分裂算法	121
5.7	应用:TV 正则化模型的若干高效算法	125
5.7.1	TV 正则化去噪模型的对偶梯度投影算法	126
5.7.2	原—对偶混合梯度(PDHG)算法	128
5.7.3	变量分裂与 ADMM 方法	129
5.7.4	Split Bregman 迭代算法	130
5.8	本章小结	132
	参考文献	132
第 6 章	超分辨关键技术:图像配准与运动估计	135
6.1	引言	135
6.2	参数化运动变换模型	135
6.3	图像配准	136
6.3.1	图像配准算法回顾	136
6.3.2	图像配准准则	137
6.3.3	基本的图像配准算法	139
6.3.4	基于几何结构相似度最大化的图像配准	141
6.4	运动估计	147
6.4.1	Lucas – Kanade 方法	147
6.4.2	光流约束方程与基本光流估计方法	148
6.4.3	图像无关正则化的光流估计方法	149
6.4.4	图像驱动正则化的光流估计方法	152
6.4.5	参数化光流的时空数据拟合	153
6.4.6	光流约束方程的变种与分析	155
6.4.7	算例——Horn 和 Schunck 模型的数值求解	155
6.4.8	算例——基于 $TV + L^1$ 的多尺度光流估计方法	157
6.5	本章小结	163
	参考文献	163
第 7 章	图像超分辨关键技术:图像盲去模糊	166
7.1	引言	166

7.2	图像盲去模糊概要	166
7.2.1	图像盲去模糊的建模框架	166
7.2.2	盲去模糊:图像先验的典型模型	167
7.2.3	盲去模糊:模糊核先验的典型模型	169
7.3	自然先验 $\text{MAP}_{u,h}$ 框架在图像盲去模糊的缺陷	169
7.4	盲去模糊:先验选择和估计方法的讨论	172
7.4.1	盲去模糊的图像先验选择	172
7.4.2	盲去模糊的估计方法	174
7.5	基于 $\text{Bi} - \ell_0 - \ell_2$ 范数正则化的图像去盲模糊方法	176
7.5.1	$\text{Bi} - \ell_0 - \ell_2$ 范数正则化模型	177
7.5.2	快速算法	178
7.5.3	试验结果与分析	180
7.6	基于自适应稀疏先验学习的图像盲去模糊变分贝叶斯方法	189
7.6.1	分层贝叶斯建模	190
7.6.2	模糊核估计模型的导出	192
7.6.3	变分贝叶斯估计算法	194
7.6.4	算法描述	196
7.6.5	试验结果与分析	197
7.7	本章小结	207
	参考文献	207
第8章	图像超分辨关键技术:图像插值	210
8.1	引言	210
8.2	传统线性插值与插值核	210
8.3	广义两步插值	213
8.3.1	广义两步插值的基本原理	213
8.3.2	广义两步插值的等价插值核	214
8.3.3	期望具有的性质	214
8.3.4	广义两步插值的典型基函数	216
8.4	核回归插值	218
8.4.1	基本原理	218
8.4.2	核回归的等价核	220
8.5	方向可控核回归插值	221
8.6	本章小结	223
	参考文献	223

第3篇 图像超分辨与增强算法专题: 变分 PDE、稀疏正则化与贝叶斯方法

第9章	基于变分 PDE 的结构保持图像插值算法	227
9.1	引言	227

9.2	图像插值退化建模	227
9.3	基于变分 PDE 的图像插值算法概述	228
9.3.1	边缘保持的正则化泛函插值	228
9.3.2	边缘增强的方向扩散 PDE 插值	229
9.4	基于角点检测算子约束的 PDE 图像插值算法	229
9.4.1	基于水平线演化理论的 PDE 插值算法性能分析	229
9.4.2	基于角点检测算子约束的正则 PDE 图像插值算法	231
9.4.3	试验结果与性能分析	233
9.5	基于角形冲击滤波器的正则 PDE 图像插值算法	237
9.5.1	基本思想	237
9.5.2	角形的强度度量准则	238
9.5.3	角形冲击滤波器设计	239
9.5.4	基于角形冲击滤波器的正则 PDE 图像插值算法	242
9.5.5	试验结果与性能分析	244
9.6	本章小结	248
	参考文献	249
第 10 章	基于稳健 MAP - MRF 先验正则化的多幅图像超分辨重建模型与算法	250
10.1	引言	250
10.2	MRF 和吉布斯场的基本原理	250
10.2.1	MRF	250
10.2.2	吉布斯场和位势	252
10.3	图像超分辨的 MAP - MRF 建模	253
10.4	构造不同的图像先验	254
10.4.1	具有双边滤波机制的图像先验	254
10.4.2	具有结构自适应各向异性滤波器及其图像先验	257
10.4.3	去噪性能分析	259
10.5	图像超分辨重建算法	261
10.5.1	参数化运动多幅图像超分辨情形	261
10.5.2	视频序列超分辨率重建	263
10.6	本章小结	269
	参考文献	269
第 11 章	基于 TV 正则化的多幅图像超分辨重建快速解耦与分裂算法	270
11.1	引言	270
11.2	退化模型	271
11.3	基于 TV 正则化的超分辨率复原模型	271
11.4	代理模型及其快速解耦算法	272
11.5	嵌套算子分裂法	275
11.6	试验结果与分析	278
11.7	本章小结	285
	参考文献	285

第 12 章 基于稀疏性正则化的多幅图像超分辨重建模型与算法	287
12.1 引言	287
12.2 观测模型	287
12.3 稀疏性正则化的图像超分辨重建模型	288
12.3.1 前向—后向算子分裂的数值求解	290
12.3.2 线性化 Bregman 迭代的数值求解	293
12.3.3 两种数值算法的分析比较	296
12.4 多形态稀疏性正则化的图像超分辨率重建	297
12.4.1 图像的多形态稀疏表示模型	297
12.4.2 多形态稀疏性正则化的图像超分辨重建模型	298
12.4.3 交替迭代数值算法	299
12.5 试验结果与分析——SRSR 模型	301
12.5.1 试验参数设置	301
12.5.2 稀疏正则化算法与 TVSR、NCSR 算法的性能比较	302
12.5.3 SRSR - FBS 与 SRSR - LBI 算法性能的对比分析	305
12.6 试验结果与分析——MSRSR 模型	307
12.7 本章小结	312
参考文献	312
第 13 章 基于图像先验的变分贝叶斯超分辨重建	314
13.1 引言	314
13.2 问题描述	315
13.3 图像 TV 先验的变分贝叶斯超分辨:TV - VBR	315
13.3.1 分层贝叶斯建模	315
13.3.2 后验分布变分逼近	316
13.4 基于图像复合先验的变分贝叶斯超分辨方法:Composite - VBR	320
13.4.1 图像复合先验	320
13.4.2 后验分布变分逼近	321
13.4.3 Composite - VBR 算法描述与讨论	323
13.5 试验结果与比较	326
13.6 本章小结	331
参考文献	332
第 14 章 色彩感知启发的彩色图像增强的变分方法	334
14.1 引言	334
14.2 经典彩色图像增强方法回顾	334
14.3 色彩增强的感知启发变分框架的分析	335
14.4 模型与算法	337
14.4.1 局部亮度自适应的对比度能量项	337
14.4.2 Wasserstein 离差能量项	338
14.4.3 能量泛函的正则逼近与最小化	339
14.5 试验结果与分析	341

14.5.1	自然度度量和组合增强度量	342
14.5.2	与原始感知启发方法的比较	343
14.5.3	与非感知启发方法的比较	346
14.5.4	对模拟降质图像增强的试验	349
14.6	本章小结	350
	参考文献	350
第 15 章	基于变分贝叶斯方法的 Retinex 算法	353
15.1	引言	353
15.2	变分贝叶斯逼近方法回顾	353
15.3	Retinex 的贝叶斯模型和推断	355
15.3.1	图像先验的建立	355
15.3.2	超参数的超先验	357
15.4	基于变分贝叶斯的 Retinex 算法	357
15.4.1	显式计算	360
15.4.2	Retinex 的变分贝叶斯方法与 Retinex 的 TV 变分方法的关系	363
15.5	试验结果与分析	364
15.5.1	与其他 Retinex 方法的比较	364
15.5.2	与非 Retinex 方法的比较	364
15.5.3	两种反射函数的测试	369
15.5.4	先验信息与置信参数的测试	370
15.5.5	超高斯先验和 SAR 先验的测试	373
15.6	本章小结	375
	参考文献	375
附录	ρ -函数	378
后记		379

第 1 篇

图像超分辨建模基础

- 第 1 章 导论
- 第 2 章 图像退化过程与超分辨观测模型
- 第 3 章 图像超分辨的代表性建模方法
- 第 4 章 图像超分辨建模基础: 图像先验

第 1 章 导 论

图像和视频超分辨率重建是一种由低分辨率退化图像(或多幅图像、序列)重建一幅(或序列)高分辨率清晰图像的第二代复原技术。超分辨率重建技术综合考虑成像过程中诸如运动变形、光学模糊、低采样率、随机噪声等各种退化因素,在航空成像、遥感成像、医学成像、层析成像等众多领域具有广泛应用前景。从数学的角度看,图像超分辨率重建是 Hardmard 意义下的非适定数学反问题,因此成为图像处理、计算机视觉和计算调和分析等多学科领域国际上众多研究者关注的热点。

分辨率是表征图像质量的重要指标,也是图像后续理解和分析的重要因素。目前提升图像分辨率的途径有硬件方法和软件方法。一方面,人们设计新的成像系统或改进现有的成像硬件来提高分辨率,成像探测技术已经由低空间分辨率向高空间分辨率发展;由低光谱分辨率向高光谱分辨率发展;由单模态成像向多模态成像发展。另一方面,人们试图从信号处理的角度,利用软件方法提高图像的分辨率。

本章首先介绍分辨率基础概念,回顾超分辨率提出的若干背景,进而回顾图像超分辨率技术的三大方法体系,并聚焦于回顾软件方法的国内外研究现状,并集中介绍多幅图像超分辨率和单幅图像超分辨率两类方法。

1.1 分辨率的基础概念

图像的分辨率是图像质量的一个关键性指标,同时分辨率也是衡量成像传感器系统性能的核心。对数字图像和视频而言,图像的分辨率与空间采样、亮度(或幅度)量化水平等相关,目前关于分辨率的概念有以下几种^[1-3]。

(1) 空间分辨率。从物理本质上讲,空间分辨率是分辨两个相邻目标最小距离的尺度,或指图像中一个像素点所代表的目标实际尺寸的大小。

在数码产品领域,图像的空间分辨率取决于数码相机中图像感光器件的像元个数。图像感光器主要包括电荷耦合元件(CCD)感光器和互补金属氧化物半导体(CMOS)感光器。一般而言,CCD 的制造工艺较为复杂,成本较高,成像品质较高,电能消耗较大;CMOS 的制造成本、成像品质、电力消耗比 CCD 低很多。对于 CCD 而言,分辨率的大小对应为 CCD 能分辨的最小感光元件,平时所说的多少万像素就是这些感光元件的个数。所以,一般来讲像素越多,成像也就越清晰,当然这其中还要受许多因素限制。但是高像素也不一定是好的 CCD,其原因就是像素大小,也是很重要的因素。相同数目的像素,排列越密集,像素之间就越容易出现电流干扰,也就是“噪点”等干扰成像质量的现象。由于制造工艺的限制,增加尺寸,成本将会以几何级数提高。现在大部分厂家的 CCD 为了提高图像的灵敏度,会使用像素合并的技术,像素合并是一种非常实用的功能,它可被用来提高像素的大小和灵敏度。

对于数字图像而言,指的是图像离散空间中每英寸所包含像素的个数,取决于采样过程

(图 1.1);采样间隔越小,空间分辨率越高,图像越清晰。图 1.2 揭示了不同像素个数($N \times N$)的图像空间分辨率的直观过程。

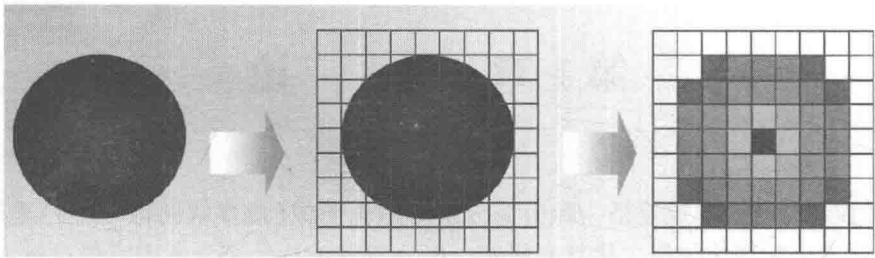


图 1.1 连续场景到数字图像的采样过程示意图

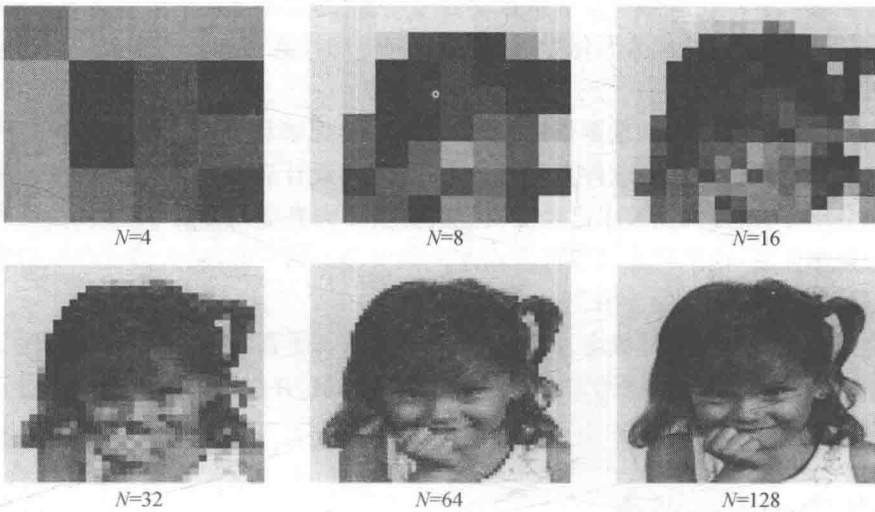


图 1.2 不同像素个数($N \times N$)的图像

(2) 亮度分辨率,又称幅度分辨率。对于成像传感器而言,对应于能够分辨的最小辐射误差,在图像中表现为灰度级,取决于图像的量化过程(图 1.3)。同时,亮度分辨率是与位深相关的概念,对于均匀量化而言,量化比特数越多分辨率越高(图 1.4)。

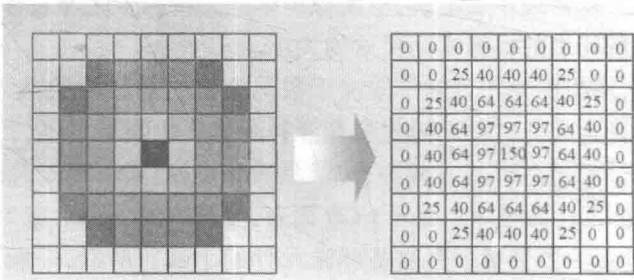


图 1.3 图像亮度水平量化过程示意图

(3) 光谱分辨率^[4]。成像传感器在接收目标辐射的波谱时所能分辨的最小波长间隔。在光谱成像领域:①多光谱成像的光谱分辨率在 mm 数量级,传感器在可见光和近红外区域一般只有几个波段。②高光谱成像的光谱分辨率在 nm 数量级,这样的传感器在可见光和近红外区域有几十到数百个波段。