

超越视觉：

人脸图像超分辨率理论与应用

卢涛 著



科学出版社

超越视觉：人脸图像超分辨率 理论与应用

卢 涛 著



科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229,010-64034315,13501151303

内 容 简 介

本书从理论和实践两个方面展开,系统呈现人脸超分辨率领域的研究成果,并列举低分辨率人脸图像应用领域的新思路和新方法,深入介绍人脸超分辨率的理论基础和算法,为广大科研工作人员、刑侦技术人员提供详细的超分辨率工具和低分辨率识别工具。在研究现有算法的基础上,提出基于场景后验降质模型估计的方法拟合实际的复杂成像场景,以及深度协作表达方法,并将其应用到人脸超分辨率领域,为深度学习理论提供新的解释方法。

本书具有较好的针对性和可操作性,是广大科技工作者了解前沿技术发展的良好资料。本书可作为计算机相关专业本科生、研究生的专业阅读材料,以及超分辨率应用领域的专业技术人员、刑侦工作专业人员的技术参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

超越视觉:人脸图像超分辨率理论与应用/卢涛著. —北京:科学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-03-057714-6

I. ①超… II. ①卢… III. ①面-图象识别-研究 IV. ①TP391.413

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 123014 号

责任编辑:杜 权 / 责任校对:董艳辉

责任印制:彭 超 / 封面设计:苏 波

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市中科兴业印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本: B5(720×1000)

2018 年 6 月第 一 版 印张: 10 3/4

2018 年 6 月第一次印刷 字数: 240 000

定价: 70.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

人类用眼睛感知五彩斑斓的世界,83%的信息依靠视觉进行感知。“千里眼”和“顺风耳”一直是古人渴望的超能力,现代社会,借助视觉传感器,人们已然能够通过哈勃望远镜领略银河星系的璀璨奥妙,还能通过电子显微镜展现细胞的结构,超越人眼视觉的梦想已经实现。然而,在实际的应用中,由于传输带宽的限制、复杂的成像条件、运动模糊、传感器器件噪声、远离摄像头等因素,各类监控摄像头获得的观测图像或视频常常分辨率低、图像质量差,无法满足对目标对象的辨识需求,依赖于机器视觉的各类应用遇到了巨大的技术瓶颈。

超分辨率技术主要用来提升图像的分辨率,增强图像的细节信息,在侦查取证、遥感、安防监控、卫星图像处理等领域获得了广泛的应用。近年来,超分辨率技术已经成为研究热点,受到全世界范围内学者的关注。从理论的角度,从观测到的低分辨率图像推测合成高分辨率图像是一个典型的病态求逆问题,是围绕数据库样本提供的先验知识展开各种约束求解理论和方法的研究。从实际应用的角度,刑事侦查、人脸识别、图像的超分辨率重建,都聚焦于增强低分辨率输入图像的高频细节信息,扩展先验信息的来源,构建方便实用的超分辨率增强服务体系,提升实际工作的效率是核心键。因此,本书关注的是如何超越现有的视觉传感器的限制,从理论和实际两个方面深入研究超分辨率技术,围绕低质量观测视频图像的分辨率增强,研究人脸图像的超分辨与识别技术,并探讨这些技术在机器人视觉领域的进一步应用。

人类智能一直是科学研究的核心问题,包括人类感知世界,识别物体,逻辑推理和想象,从神经元到突触,从大脑皮层到感情体验,每一个环节无不和视觉相关。超越现有观测到的低分辨率视觉,利用机器学习理论和方法拟合视觉的识别过程,一直是机器视觉领域研究者的梦想。在这样一个梦想的鼓舞下,本书着重分析人脸超分辨率的理论、算法和

应用体系,系统介绍人脸超分辨率的研究理论基础、前沿算法和实际应用案例,给读者以启发,并呈现出本课题组在系统研究过程中获得的部分研究成果供技术同行参考。

本书共8章。第1章是绪论,介绍本书研究的背景和意义,超分辨率问题在理论和实践中遇到的问题,为读者呈现研究对象和领域。第2章介绍基于后验信息的图像降质过程自适应估计,拟合实际复杂场景的图像降质过程,增加超分辨率的实际效果,展现本课题组在实际工作中遇到的案例和部分实验结果,便于读者了解相关技术的实用性。第3章为基于半耦合非负表达的自适应全局脸超分辨率算法,在全局脸算法中引入核非负表达分解,探索在先验表达中的非线性方法的有效性。第4章介绍基于主成分稀疏表达的自适应局部脸超分辨率算法,研究主成分稀疏表达在图像块上的合成与表达方法。第5章介绍基于深度协作表达的人脸超分辨率算法,将传统的浅层表达方法推广到深层表达体系,和现有深度学习方法无法进行物理对应解释不同,深度协作表达方法提出多层的可解释的表达机制,为深度学习方法提供了新的途径。第6章为基于低秩约束的极限学习机高效人脸识别算法,极限学习机的训练时间非常短,克服了深度学习算法训练对GPU的依赖和巨大的算法开销。第7章介绍基于图像超分辨率极限学习机的极低分辨率人脸识别算法,在获得超分辨率人脸图像的基础上进行人脸识别,提出极低分辨率的人脸识别算法,取得了较好的识别效果。第8章介绍基于云计算的刑侦图像增强服务框架,系统介绍本书研究的算法如何构建成为云计算服务模式,以及在实际案例中的处理方法和结果,为刑侦领域人员提供新的业务工作模式。后记详细总结本书的研究内容,并对未来的研究进行展望。

本书得到国家自然科学基金项目“基于时空域流形一致性学习的监控视频超分辨率研究”湖北省自然科学基金项目“面向智慧家庭的服务机器人基础技术问题研究”“机器人全景立体视觉成像与重建理论及关键技术研究”“基于多层并行核极限学习机的机器人视觉图像超分辨率研究”的资助。

感谢武汉大学计算机学院胡瑞敏教授、武汉工程大学张彦铎教授对本书的研究工作给予极大的支持和指导,感谢朋友在科研工作上的帮助与启发,感谢家人为作者研究工作的努力和付出。

卢涛

2017年10月于武汉

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 图像降质模型研究现状	6
1.2.2 人脸超分辨率方法研究现状	12
1.2.3 研究现状小结	20
1.3 面临的关键问题	21
1.3.1 实际降质先验信息提取与表达	21
1.3.2 高低分辨率图像非负特征一致表达	22
1.3.3 图像主成分稀疏表达	23
1.4 研究内容	23
1.4.1 基于后验信息的图像降质过程自适应估计	23
1.4.2 半耦合核非负表达全局脸超分辨率算法	24
1.4.3 主成分稀疏自适应局部脸超分辨率方法	25
1.4.4 低秩约束的极限学习机高效人脸识别算法	25
1.4.5 低秩约束的极限学习机高效人脸识别算法	25
1.4.6 图像超分辨率极限学习机的极低分辨率人脸识别算法	26
参考文献	26
第 2 章 基于后验信息的图像降质过程自适应估计	30
2.1 引言	30
2.2 方法比较	32
2.3 基于稀疏最近邻约束的视频多帧融合算法	34
2.3.1 视频图像的时域先验模型	34
2.3.2 基于图像时域先验模型的视频多帧融合算法	35

2.4 基于后验图像的降质过程自适应估计	36
2.4.1 现场重建获取后验图像的原则与方法	37
2.4.2 基于尺度不变特征的后验图像对齐	38
2.4.3 基于后验信息的实际下采样矩阵估计	39
2.4.4 基于后验信息的实际模糊矩阵估计	40
2.4.5 基于后验降质模型的人脸超分辨率算法	41
2.5 实验结果及分析	43
2.5.1 实验目的与原理	43
2.5.2 实验条件及设备	44
2.5.3 测试标准及实验方法	45
2.5.4 实验数据及处理	46
2.5.5 实验结论	54
参考文献	55
第3章 基于半耦合核非负表达的全局脸超分辨率算法	57
3.1 引言	57
3.2 方法比较	59
3.3 基于人脸形状特征度量的自适应先验选择算法	60
3.3.1 基于人脸形状感知模型的特征定位方法	61
3.3.2 基于 Hausdorff 距离的人脸形状相似性度量	63
3.4 基于半耦合核非负表达的自适应全局脸超分辨率算法	64
3.5 实验结果及分析	66
3.5.1 实验目的与原理	66
3.5.2 实验条件及设备	67
3.5.3 测试标准及实验方法	67
3.5.4 实验数据及处理	69
3.5.5 实验结论	78
参考文献	79
第4章 基于主成分稀疏表达的自适应局部脸超分辨率算法	82
4.1 引言	82
4.2 方法比较	84
4.3 基于线性表达的分块聚类方法	85
4.4 基于主成分稀疏表达的自适应局部脸超分辨率算法流程	86
4.4.1 主成分稀疏表达模型	86

4.4.2 基于主成分稀疏表达的超分辨率算法	87
4.5 实验结果及分析	89
4.5.1 实验目的与原理	89
4.5.2 实验条件及设备	89
4.5.3 测试标准及实验方法	90
4.5.4 实验数据及处理	91
4.5.5 实验结论	95
参考文献	96
第5章 基于深度协作表达的人脸超分辨率算法	97
5.1 引言	97
5.2 方法比较	98
5.3 基于深度协作表达的人脸超分辨算法流程	100
5.3.1 单层协作表达	100
5.3.2 字典训练	100
5.3.3 基于深度协作表达的人脸超分辨率算法步骤	101
5.4 实验结果与分析	102
5.4.1 实验目的与原理	102
5.4.2 实验条件及设备	103
5.4.3 测试标准及实验方法	103
5.4.4 实验数据及处理	104
5.4.5 实验结论	112
参考文献	112
第6章 基于低秩约束的极限学习机高效人脸识别算法	114
6.1 引言	114
6.2 方法比较	115
6.3 基于低秩约束的极限学习机高效人脸识别算法流程	116
6.3.1 基于低秩支持的极限学习机鲁棒性人脸识别	116
6.3.2 特征脸学习	119
6.3.3 低秩结构特征支持的极限学习机人脸识别算法	120
6.4 实验结果及分析	121
6.4.1 实验目的与原理	121
6.4.2 实验条件及设备	122
6.4.3 测试标准及实验方法	122

6.4.4 实验数据及处理	122
6.4.5 实验结论	128
参考文献	128
第7章 基于图像超分辨率极限学习机的极低分辨率人脸识别算法	130
7.1 引言	130
7.2 方法比较	131
7.3 基于图像超分辨率极限学习机的极低分辨率人脸识别算法流程	134
7.3.1 基于稀疏表达的极低分辨率人脸的超分辨率算法	135
7.3.2 基于极限学习机的人脸分类算法	137
7.4 实验结果与分析	139
7.4.1 实验目的与原理	139
7.4.2 实验条件及设备	140
7.4.3 测试标准及实验方法	140
7.4.4 实验数据及处理	141
7.4.5 实验结论	145
参考文献	146
第8章 基于云计算的刑侦图像增强服务框架	148
8.1 引言	148
8.2 刑侦业务的核心需求与技术问题	149
8.3 基于云计算的刑侦图像资源中心构架	150
8.4 刑侦图像增强服务平台框架	152
8.5 实际演示	155
8.5.1 模糊图像的实际演示 1	155
8.5.2 模糊图像的实际演示 2	156
附录 图像质量评估指标	158
后记	160

第1章 绪 论

1.1 研究背景和意义

改革开放以来,我国经济进入高速发展时期,在社会发展取得举世瞩目成绩的同时,也进入了矛盾凸显期。中国社会科学院的“当代中国社会结构变迁研究”课题组指出:我国人均 GDP 已经进入 1 000 美元到 3 000 美元的时期,既是黄金发展时期,又是矛盾凸显时期。在新的形势下国内安全形势出现了新的变化:保障人民群众的生命财产安全成为国家的重要关注点。

为了保障公安安全、维护社会稳定,我国政府积极推动“应急体系”“平安社会”“平安城市”“3111 工程”等重大项目的实施,利用先进的安防技术对突发事件和安全隐患进行预防。近年来国家投入 3 000 亿元资金在全国 660 多个城市实施平安城市视频监控工程,建立了较为完善的视频监控体系。这些已建成的视频监控系统在公安机关的刑事侦查业务中得到了广泛应用,并发挥了重要作用。视频侦查技术已经成为新的破案增长点,公安机关中的视频图像业务已经成为发展最快的业务之一。视频侦查技术已成为继刑事技术、行动技术、网侦技术之后侦查破案的第四大技术支撑^[1]。监控视频在刑侦业务中的作用越来越重要,部分地区的公安机构成立了专门的视频侦查支队,有效地整合、集约利用社会监控资源,是公安刑侦手段的创新,有效地提高了刑事侦查的效率,为保障人民群众的安全和维护国家稳定发挥了重要作用。

刑事侦查的主要目的是重现案件现场的嫌疑目标的犯罪活动轨迹,并取得实际的证据,从而侦破案件。实际的工作中,侦查员都是以案发现场为中心,从时间和空间维度上获得犯罪嫌疑人的活动规律,进而通

过分析、推断获得嫌疑目标的犯罪证据,对监控视频中出现的进行准确识别是破获与分析案情线索的关键与核心。然而,在实际监控应用中,嫌疑目标常常难以直接辨识,主要原因是:一方面摄像头和人脸距离通常较远,低分辨率的目标图像难以提供足够的可供识别的细节信息;另一方面视频监控系统中光学器件模糊,现场环境、传输压缩噪声等干扰,使目标对象的细节信息出现误差,难以提供人脸辨识所需要的特征信息。因此,对实际的低分辨率人脸图像进行分辨率提升处理,进而提升目标图像的可辨识度是视频侦查业务的核心技术需求。如图 1-1 所示,人脸超分辨率技术能够利用人脸样本图像重建出与原始低分辨率人脸图像最相似的高分辨率人脸图像,有效增强监控视频中低质量人脸图像的分辨率,从而恢复出人脸可供识别的特征细节信息,这对提高人脸图像的分辨率、提升人脸辨识的准确性,进而提高公安机关的破案率具有重要意义。



图 1-1 实际人脸图像超分辨率增强原理示意图

为了解决实际监控环境的人脸超分辨率问题,从 2008 年起,作者课题组开展了人脸超分辨率等刑侦图像应用领域关键技术的研究。在研究和实验过程中发现,现有人脸超分辨率算法虽然对仿真条件下的低分辨率图像具有较好的质量增强效果,但是对刑侦应用中实际监控图像的

增强效果却显著下降。

如图 1-2 所示,监控视频的成像过程主要由四个部分组成:成像对象的物理场景、光照与反射、摄像机成像、数字图像处理。虚线框中是每个组成部分中对成像造成影响的因素,其中,摄像机成像环节包含光学成像和电荷耦合器(charge coupled device, CCD)成像完成光学信号到电信号的转变过程。依据光学成像原理和 CCD 采样设备原理,结合国内外文献,总结造成实际监控视频分辨率下降的主要原因如下:

(1) 成像系统本身的局限。根据光的干涉与衍射现象,光学器件对空间中的物体分辨率有极限,光学器件自身的点扩散效应也会对成像造成模糊,与此同时,从光学图像到实际电信号的采样过程也有局限,如常见的 CCD 成像存在空间分辨率的局限。同时,图像在传输、编码过程中产生的噪声都会直接影响实际图像的分辨率。

(2) 环境因素。例如,气候对成像的影响、雨雾天气造成的水汽会直接影响成像的清晰度,大气扰动会给成像过程带来模糊;光照等自然条件也会给成像造成干扰,如在夜间和针对光源的极端光照环境下,成像质量急剧下降,这些因素也会影响实际监控图像的分辨率。

(3) 摄像过程因素。在实际监控中,目标对象的运动会造成运动模糊,姿态变化导致的侧面人脸会增加识别难度,摄像机拍摄焦距不准,也会造成散焦模糊、目标对象的遮挡等,这些都是监控视频中常见的影响图像分辨率的因素。

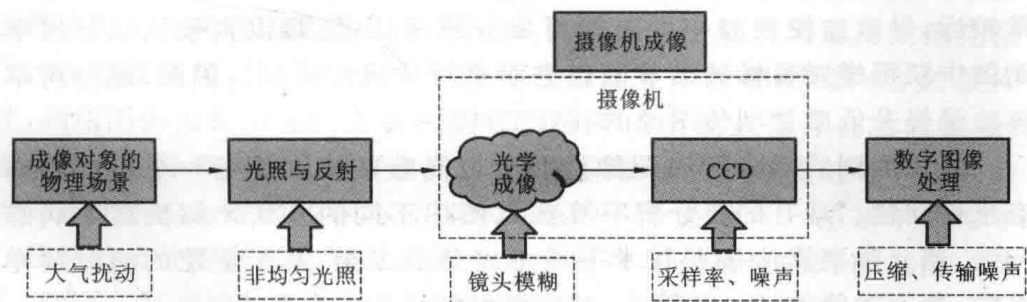


图 1-2 监控设备成像过程示意图

与仿真实验最大的不同之处在于仿真实验所使用的样本库是高质量高分辨率图像,输入的测试图像是经过假定的降质过程获得。然而,实际监控视频图像质量受上述因素影响,降质过程难以准确估计。当假定的图像降质过程和实际的降质过程存在差异时,在仿真实验条件下获

得良好重建效果的传统超分辨率算法,对实际监控视频图像不能获得理想的重建效果。与此同时,实际降质干扰使得传统超分辨率的流形一致性假设难以保证,导致重建的超分辨率图像质量急剧下降。最后,实际监控环境中的诸多因素均会对图像产生降质干扰,导致像素变暗、失真、混叠,实际降质干扰增大了图像表达的误差,进而影响超分辨率图像的重建质量。

因此,针对实际图像多样性和成像模糊、噪声干扰导致的低分辨率监控图像重建质量急剧下降的问题,研究对环境自适应、对降质干扰鲁棒的超分辨率技术是实际监控视频刑侦图像应用中人脸超分辨率深度应用亟待开展的工作。这对于攻克先验知识不准确和降质干扰导致的人脸超分辨率重建图像质量急剧下降的重大技术难题,提高实际监控中低质量人脸辨识的准确性,进而提高公安部门破案率、维护人民群众生命财产安全具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

超分辨率技术主要用来提升图像的分辨率,增强图像的细节信息,在侦查取证、遥感、安防监控、卫星图像处理等领域获得了广泛的应用。近年来,超分辨率技术已经成为研究热点,受到全世界范围内学者的关注。然而,在实际监控视频中,由于监控对象和监控设备之间的距离通常较远,导致监控视频中的目标对象分辨率较低,难以直接从低分辨率图像中获得嫌疑目标的细节信息进而进行准确的研判。因此,超分辨率算法是提升低质量刑侦图像的有效工具之一。

从观测到的低分辨率图像推测合成高分辨率图像是一个典型的病态求逆问题。现有的超分辨率算法试图用不同的方法来解决这个病态问题,超分辨率算法按照技术手段可以分成三类:基于重建的超分辨率算法、基于插值的超分辨率算法、基于学习的超分辨率算法。

基于重建的超分辨率算法需要从同一场景的多帧低分辨率图像中恢复出高分辨率图像。需要对输入的多帧图像进行配准,然后通过多帧信息将低分辨率图像中的像素点安排到高分辨率图像的网格中,从而实现低分辨率图像的分辨率增强。基于重建的超分辨率算法^[2-5]受配准精度、降质模型误差和信号噪声的影响,从而导致其重建高分辨率图像的能力受到限制。相关文献^[6]已经证明在一般情况下,基于重建的超分

分辨率算法有效的放大倍数仅为 1.6 倍。但是,基于重建的超分辨率算法有较好的信号还原能力,在图像配准精度较高的遥感图像领域应用范围广泛,取得了良好的重建效果^[6]。

基于插值的超分辨率算法^[7-9]的核心思想是将低分辨率图像安排在高分辨率图像的网格中,利用邻近插值点像素值计算待插值点的像素值,这类方法的计算复杂度低,容易实现,已经成为应用最为广泛的超分辨率算法^[11]之一。但是,基于插值的超分辨率算法对噪声比较敏感,对图像边缘部分的处理存在过平滑现象,特别是在放大倍数比较大的情况下,难以取得理想的效果。

基于学习的超分辨率算法通过样本库中的先验知识来约束重建过程,将机器学习与统计学习的理论和方法应用到超分辨率算法中,样本的先验信息给图像重建提供了更多的信息,从而提升了超分辨率重建图像的主客观质量。近年来由于其良好的重建效果受到广泛关注,成为图像超分辨率研究的热点方向。

在实际研究过程中发现,现有的基于学习的超分辨率算法在仿真条件下能够取得较好的主客观图像重建质量,然而在针对实际监控环境下输入的超分辨率图像难以达到令人满意的效果。其原因有两点:①基于重建的超分辨率算法依赖于信号的降质模型,利用模型先验信息约束高分辨率图像求解过程;基于学习的超分辨率算法依赖于高低分辨率的样本库所提供的先验知识,而低分辨率的样本库制备依赖于图像的降质模型。因此,无论是基于重建的超分辨率算法还是基于学习的超分辨率算法都依赖于准确的图像降质过程估计,传统的方法是利用通用图像先验估计图像模糊核,然而由于图像降质过程的复杂性和图像内容的多样性,利用图像先验信息约束实际监控图像降质模糊核估计会增大误差,进而降低超分辨率算法的重建质量,因此获取与实际降质过程一致的准确降质约束成为解决实际超分辨率问题的一个关键点。②基于流形学习理论的超分辨率算法假设高低分辨率图像具有相似的局部几何一致性,然而实际成像过程中的噪声和扰动带来的干扰,使得高低分辨率图像对应的流形一致性发生了改变,高低分辨率图像之间的几何一致性假设无法保证,使得图像的重建质量下降;另外,实际监控视频图像中存在的降质干扰,使得现有的基于图像内容表达的超分辨率算法的重建误差增大,在合成输入图像内容的同时,将噪声等降质干扰也进行了合成,导致实际监控图像的超分辨重建质量急剧降低,这直接制约了人脸超分辨率在刑事侦查中的应用效果。

因此,本书将针对面向实际刑侦应用的人脸超分辨率开展研究,从图像的降质模型与人脸超分辨率两个方面进行综述。

1.2.1 图像降质模型研究现状

图像的降质模型是描述图像从理想的高分辨率到实际观测到的低分辨率图像成像过程的数学模型^[12]。而光学图像的成像是一个复杂的光电转化过程,其物理成像过程完整描述了理想的物理场景成像到电子图像的转化,如图 1-2 所示。为了准确地分析成像系统降质过程中的各种因素,并对这些降质因素进行建模和数学分析,本书首先介绍图像的物理成像模型,从光学成像角度分析光学镜头、成像器件、下采样、系统噪声对生成图像的不同影响及其数学表达形式。然后在获得图像降质模型数学表达的基础上,对目前降质模型中图像降质模糊核估计技术进行深入的分析与研究。因此,本部分内容从图像的物理成像模型和图像降质模型两个方面展开论述。

1.2.1.1 图像的物理成像模型

如图 1-2 所示,影响图像成像质量的主要因素是镜头的光学模糊、CCD 模糊、下采样和系统噪声。本书依据图像的成像过程,分别对成像的每个环节进行建模与分析。

1) 光学模糊

理想的光学系统假设从传感器获得的辐射图是和景物具有几何一致的副本图像。一般来说,受光学衍射效应的影响,景物中一点在成像系统中往往是一个小的模糊核作用后的结果,如图 1-3 所示。现有文献中将光学成像系统用线性移不变系统进行建模。假设景物用函数 $f(x, y)$ 表示,图像用 $g(x, y)$ 表示,模糊核是卷积形式的点扩散函数,可以得到如下公式:

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) \quad (1.1)$$

其中: $h(x, y)$ 表示点扩散函数,*表示卷积操作。通常对光学系统产生影响的因素主要是光圈的衍射点扩散函数,对于衍射受限的光学系统,有

$$h_{\text{optics}}(x, y) \approx h_{\text{diff}}(x, y) \quad (1.2)$$

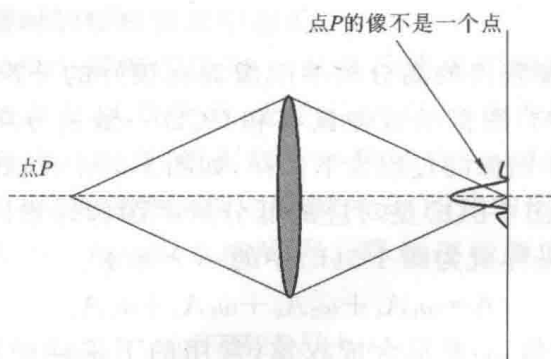


图 1-3 光学系统中点的成像点扩散现象

2) 成像器件模糊

成像器件模糊主要是 CCD 模糊, 可以定义成探测器的点扩散模糊与检测器的采样模糊两个操作, 过程如图 1-4 所示。CCD 采样出现的景物模糊可以看成探测器孔径点扩散函数与景物图像的卷积。检测器采样模糊: 由于光线到达一个检测器上时, 检测器的中心产生一个输出, 这样在检测器中心之间的部分信息会丢失。

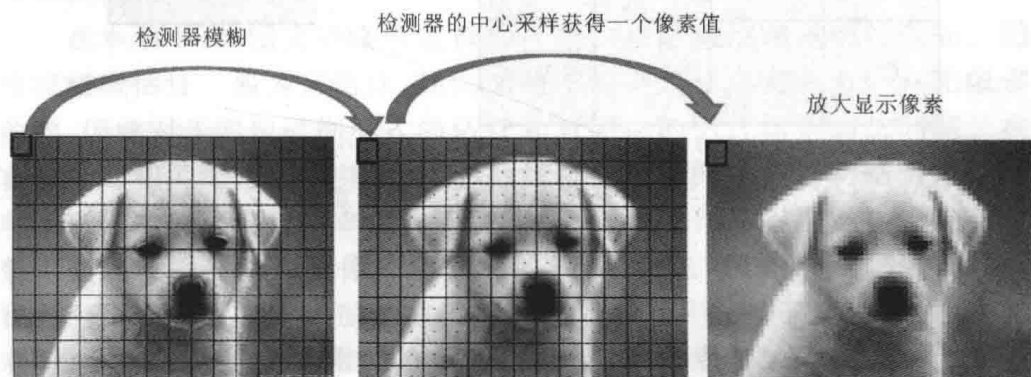


图 1-4 CCD 模糊与检测器采样模糊操作

基于以上模型, 经过光学模糊、CCD 模糊与采样混叠后的传递函数为

$$H_{\text{image}}(\xi, \eta) = H_{\text{optics}}(\xi, \eta) \times H_{\text{detector}}(\xi, \eta) \quad (1.3)$$

其中: 式(1.3)为频域图像生成模型, 空域中的卷积操作在频域中变换成乘法操作。

3) 下采样

理想光学成像获得的高分辨率图像具有很好的分辨细节,然而 CCD 采样受器件的影响,图像的成像具有和 CCD 一致的分辨率,定义高分辨率图像到低分辨率图像的过程为下采样,如图 1-5 所示,图 1-5(a)是高分辨率图像像素网格,图 1-5(b)是对应的低分辨率图像像素网格图,图 1-5(a)中的四个像素下采样成为图 1-5(b)中的一个像素。

$$A = \omega_1 A_1 + \omega_2 A_2 + \omega_3 A_3 + \omega_4 A_4 \quad (1.4)$$

其中: A 表示像素值, ω 表示合成权重,常用的下采样使用四像素取一个像素安排到低分辨率图像网格中,或者取高分辨率四个像素的平均值作为低分辨率像素。

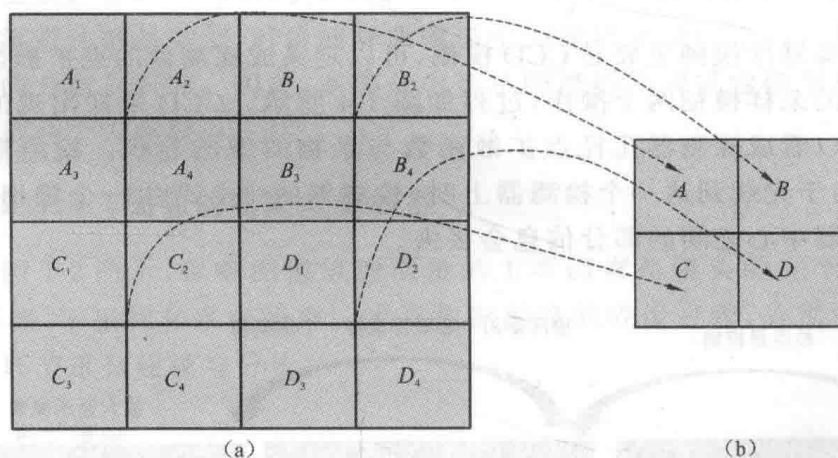


图 1-5 高分辨率图像下采样示意图

4) CCD 噪声

当光子到达 CCD 传感器表面时,CCD 的检测器会产生与光子强度相当的电压值,这个过程会产生随机噪声,特别是在光线比较弱的情况下,到达 CCD 检测器表面的电压值很微弱,甚至与 CCD 自身的电荷相当,这样产生的是 CCD 暗电流噪声。随机噪声会增加信号的不确定性,用标准差来衡量。如果噪声的分布是独立的,那么系统噪声方差是各种噪声方差之和。对于各种不同的噪声,整体噪声的标准方差为

$$\sigma_{\text{noise}} = \sqrt{\sum_{n=1}^N \sigma_n^2} \quad (1.5)$$