

# 计算摄影学基础

## Computational Photography

张茂军 刘煜 王炜 张政◎著



科学出版社

# 计算摄影学基础

张茂军 刘煜 王炜 张政 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书将计算摄影学所涵盖的主要技术囊括其中。本书全面地介绍了计算摄影学中各种技术的基础知识,清晰地阐明了各基础知识的原理,以及目前最先进的技术成果,并对计算摄影学的未来进行了分析。本书特别关注计算摄影技术在工程中的实际应用,将各种技术应用后的效果作为实例呈现给读者,在加强理论和实践关联的同时,也让读者更直观地感受计算摄影技术给我们生活带来的改变。

本书可作为计算机视觉、图像处理、机器学习等领域的研究生教材,也可供计算机视觉领域科研人员、摄像机研制与生产相关工程技术人员以及数字摄影爱好者阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

计算摄影学基础/张茂军等著. —北京: 科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-042094-7

I. ①计… II. ①张… III. ①计算机应用—摄影学 IV. ①TB81-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第230142号

责任编辑: 陈晓萍 / 责任校对: 马英菊

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 北大彩印

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014年9月第一版 开本: 787×1092 1/16

2014年9月第一次印刷 印张: 15 3/4 插页: 12

字数: 350 000

定价: 48.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62142126 编辑部电话 010-62138978-2009

版权所有, 侵权必究

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

## 前 言

计算摄影学 (Computational Photography) 是由美国哥伦比亚大学、麻省理工学院、斯坦福大学等几个国际知名学府的教授发起创立的一门新兴学科, 它是在数字摄影学 (Digital Photography) 的基础上, 增加对成像过程与设备的精确控制、对影像的更复杂处理与计算, 并使用 3D 成像、全景处理等新颖的数字媒体处理技术, 从而在摄像过程中彻底引入计算单元的一套理论、方法与技术。当前, 计算摄影技术已经成为国际上的研究热点, 斯坦福大学、哥伦比亚大学、卡内基梅隆大学、麻省理工学院、北卡罗来纳大学等均成立了相关研究机构, 开设了相关研究生课程。在国内, 已有清华大学、浙江大学、国防科学技术大学、西北工业大学、西安电子科技大学等学术单位做了大量前沿性学术研究。

我们从事计算摄影学的相关研究 20 多年, 特别是近 10 年来, 从镜头设计、编码孔径设计、CMOS 的控制成像、颜色恒常性到后端的智能分析算法等都进行过较为深入的研究, 对计算摄影学相关研究领域有一定的理解, 并负责建设国防科学技术大学慕课课程: “计算摄影: 艺术与技术的交融” (课程视频可以从 “[http://www.visionsplend.com/service/?catalog\\_332\\_1.html](http://www.visionsplend.com/service/?catalog_332_1.html)” 下载观看)。本书是对我们多年研究工作的总结, 同时尽量考虑覆盖计算摄影学涉及的研究领域, 所以在我们研究工作的基础上做了适当的扩展, 虽然如此, 还是有很多计算摄影学相关研究领域在书中没有涉猎。

本书共 14 章。第 1 章讲述了计算摄影学的基本概念、主要研究领域, 并对计算摄影学未来发展方向发表一点看法。第 2 章总结了传统摄影学与数字摄影学的一些基础知识。第 3 章讲述了颜色与颜色空间。第 4 章概述了数字感光器件的基础知识。第 5 章论述了自动聚焦技术。第 6 章介绍了自动曝光和自动白平衡技术。第 5 章与第 6 章共同构成了摄像机的基础性技术——3A 技术。第 7 章介绍了高动态范围成像技术。第 8 章~第 10 章是与全景图像处理相关的技术介绍, 其中, 第 8 章总述了全景成像相关理论与方法, 第 9 章介绍了图像拼接技术, 第 10 章介绍了图像融合技术。第 11 章对前沿性的光场成像技术做了概括性介绍。第 12 章介绍了图像去噪技术。第 13 章对前沿性的压缩成像技术做了概括性介绍。第 14 章介绍了模糊图像复原技术。

第 1 章、第 2 章和第 4 章由张茂军教授撰写; 第 7 章、第 11 章、第 12 章和第 14 章由刘煜博士撰写; 第 3 章由王伟教授撰写; 第 5 章由张政博士撰写; 第 6 章由谭鑫撰写; 第 8 章由左承林撰写; 第 9 章由彭杨撰写; 第 10 章由李靖撰写; 第 13 章由娄静涛博士撰写。全书由张茂军统稿。

实验室熊志辉副教授、张军教授、包卫东教授、徐玮副教授、谭树人副教授、翟永平博士以及博士生赖世铭、陈旺、高辉、陈立栋、李乐、周韬、石崇林、王斌、李永乐、肖文华等, 硕士生尹晓晴、石皓、吕济民、王媛媛、夏青等, 他们的研究成果直接或间接为本书提供了素材, 也正是由于他/她们的多年共同努力, 为实验室积累了丰富的研究成果, 才有了本书的撰写成稿。计算摄影技术工程研究中心的詹万政、杨健群、韩金军、

刘剑平、陈捷、胡志、彭继湘、龙猜、刘镖、王博、段稳、黄锋、邓建辉、穆长富、刘电芝、刘述杰、周博将、车阳、彭素波、罗文峰、杨佳、朱可瑀、贺云飞、张弘强、李飞等，他们每天加班加点开展研发工作，其研发成果为我们进一步探索计算摄影学理论提供了技术基础。感谢西南财经大学母睿同学在高动态成像技术方面分享的研究成果。感谢微软亚洲研究院袁路博士在图像去模糊技术研究方面对我们做出的指导性工作。感谢欧阳合博士、周经伦教授为我们在光场成像技术方面的研究贡献了大量有价值的见解。

感谢我的恩师胡晓峰少将，是他在 20 世纪 80 年代末带领我们进入科学研究殿堂。感谢浙江大学的潘志庚教授，北京理工大学的王涌天教授，西北工业大学的王庆教授，西南财经大学的段江教授，国防科学技术大学的查亚兵教授、张维明教授，他们在学术上对我们的帮助与鼓励始终是我们不断前行的动力。

感谢国家自然科学基金委的支持，国家自然科学基金项目（No. 61403403，No. 61402491，No. 61175006，No. 61175015，No. 61271438，No. 61275016，No. 60803101，No. 60872150）的资助是我们实验室早期主要的经费来源。

由于计算摄影学属新兴学科，许多概念与理论尚处于讨论与探索阶段，本书的许多观点基于我们个人的认识与实践，难免有诸多疏漏、错讹与片面性，恳请读者不吝赐教。

# 目 录

## 前言

第 1 章 概述	1
1.1 计算摄影学的起源	1
1.2 计算摄影学的相关概念	2
1.3 计算摄影学涉及的研究领域	4
1.4 计算摄影学的未来	8
参考文献	11
第 2 章 摄影学基础知识	12
2.1 传统摄影学基础	12
2.1.1 摄影是用光的艺术	12
2.1.2 镜头与焦距	14
2.1.3 快门与曝光	17
2.2 数字摄影学基础	20
2.2.1 数码相机的基本原理	20
2.2.2 图像分辨率	22
2.2.3 图像信号处理器	22
2.2.4 压缩与存储	23
2.3 摄影学的技术性与艺术性	23
参考文献	24
第 3 章 颜色与颜色空间	25
3.1 颜色知觉与可见光	25
3.2 颜色视觉理论	28
3.3 颜色感知特性	30
3.4 颜色空间	32
3.5 基于彩色滤镜阵列的彩色感知	37
3.5.1 Bayer 格式的 CFA 彩色滤镜阵列设计	37
3.5.2 其他创新的 CFA 彩色滤镜阵列设计	38
参考文献	39
第 4 章 数字感光器件	41
4.1 数字感光器件的发展历程	41
4.2 数字感光器件的结构	42
4.2.1 CCD 的结构	42
4.2.2 CMOS 的结构	46
4.3 数字感光器件的指标	49

4.3.1	感光度	49
4.3.2	成像质量的衡量指标	50
	参考文献	51
<b>第5章</b>	<b>自动聚焦技术</b>	<b>53</b>
5.1	概述	53
5.2	对比度检测自动聚焦	54
5.2.1	聚焦值计算	55
5.2.2	聚焦峰值搜索	64
5.3	图像模糊度评估	67
5.3.1	模糊度与锐度的关系	67
5.3.2	基于视觉模糊阈的模糊度量	68
5.4	总结	71
	参考文献	71
<b>第6章</b>	<b>自动曝光与自动白平衡技术</b>	<b>72</b>
6.1	概述	72
6.1.1	自动曝光与自动白平衡的必要性	72
6.1.2	曝光的基本概念	72
6.1.3	白平衡的基本概念	75
6.2	自动曝光技术	77
6.2.1	常用测光技术	79
6.2.2	更先进的自动曝光控制	80
6.3	自动白平衡技术	87
6.3.1	基于图像统计特征的方法	88
6.3.2	基于学习训练的方法	93
6.4	总结	98
	参考文献	99
<b>第7章</b>	<b>高动态范围成像技术</b>	<b>102</b>
7.1	概述	102
7.2	HDRI 技术的处理机制和步骤	103
7.2.1	HDR 图像的获取简介	103
7.2.2	全亮度图的合成简介	103
7.2.3	色调映射技术简介	104
7.3	HDR 图像的获取	104
7.4	全亮度图合成	106
7.4.1	照相机响应曲线的估计	107
7.4.2	HDR 合成图像存储格式	108
7.4.3	照度图的合成方法	109
7.5	色调映射技术	111
7.5.1	全局色调映射算法	111

7.5.2 局部色调映射算法	115
7.6 总结与展望	119
参考文献	120
<b>第8章 全景成像技术</b>	<b>122</b>
8.1 概述	122
8.1.1 全景图像	122
8.1.2 全景成像方法	123
8.2 拼接式全景成像	124
8.2.1 基于单相机旋转拍摄的全景成像	124
8.2.2 基于多相机同时拍摄的全景成像	125
8.2.3 投影算法	126
8.3 鱼眼全景成像	134
8.3.1 鱼眼镜头	135
8.3.2 成像投影模型	136
8.3.3 鱼眼图像的校正算法	138
8.4 折反射全景成像技术	141
8.4.1 折反射全景成像原理	141
8.4.2 单视点折反射全景成像	143
8.4.3 全向图像的展开	145
8.4.4 互补结构折反射全景成像系统	146
参考文献	149
<b>第9章 图像拼接技术</b>	<b>150</b>
9.1 概述	150
9.2 图像配准	151
9.2.1 基于特征的图像配准	152
9.2.2 基于区域的图像配准	154
9.3 最佳缝合线查找	154
9.3.1 静态图像的最佳缝合线查找	155
9.3.2 视频拼接的最佳缝合线查找	156
参考文献	164
<b>第10章 图像融合技术</b>	<b>165</b>
10.1 概述	165
10.2 加权平均融合法	165
10.3 金字塔融合法	167
10.3.1 算法思想	167
10.3.2 算法流程	168
10.3.3 融合结果	169
10.4 梯度域融合法	170
10.4.1 算法思想	170



10.4.2	算法流程	170
10.4.3	融合结果	171
10.5	结构变形	172
10.5.1	算法思想	173
10.5.2	算法流程	173
10.5.3	融合结果	175
	参考文献	176
<b>第 11 章</b>	<b>光场成像技术</b>	<b>177</b>
11.1	概述	177
11.2	光场的数学定义	177
11.3	照相机阵列光场成像技术	179
11.3.1	照相机阵列的结构和图像采集	179
11.3.2	照相机阵列的数字重聚焦原理	179
11.4	微透镜光场成像技术	184
11.4.1	微透镜光场照相机计算成像原理	184
11.4.2	微透镜光场照相机的数字重聚焦原理	185
11.5	总结与展望	186
	参考文献	187
<b>第 12 章</b>	<b>图像去噪技术</b>	<b>188</b>
12.1	概述	188
12.2	图像去噪的基本概念	189
12.2.1	图像噪声的分类	189
12.2.2	去噪效果评价指标	191
12.3	传统去噪算法	192
12.3.1	基于空间域的中值滤波	192
12.3.2	基于小波域的小波阈值去噪	192
12.3.3	基于 PDE 的图像去噪	193
12.3.4	全变分图像去噪	194
12.4	非局域均值去噪算法	195
12.4.1	NLM	195
12.4.2	BM3D	198
12.5	基于稀疏模型的去噪算法	201
12.5.1	稀疏表示简介	201
12.5.2	稀疏去噪原理及模型	202
12.5.3	字典构建算法	203
12.5.4	稀疏分解算法	204
12.5.5	稀疏表示去噪效果	205
12.6	总结	206
	参考文献	207

---

第 13 章 压缩成像技术	209
13.1 概述	209
13.2 压缩感知基本理论	209
13.2.1 稀疏表示	209
13.2.2 测量矩阵	210
13.2.3 重构算法	211
13.3 压缩成像技术	211
13.3.1 单像素照相机	212
13.3.2 基于编码孔径的压缩成像	213
13.3.3 CMOS 压缩成像	214
13.4 总结	216
参考文献	216
第 14 章 模糊图像复原技术	218
14.1 概述	218
14.2 图像模糊的类型	219
14.2.1 大气模糊	219
14.2.2 散焦模糊	219
14.2.3 运动模糊	220
14.3 图像复原的数学模型	222
14.3.1 盲卷积	222
14.3.2 模糊核的估计	224
14.3.3 非盲卷积	228
14.4 计算摄影中的技术应用	231
14.4.1 编码曝光技术	231
14.4.2 编码孔径技术	235
14.5 总结与展望	239
参考文献	240

# 第 1 章 概 述

又一个百年老店败落了！柯达，这家曾经拥有近 15 万员工、几乎是“摄影”的代名词的商业帝国风雨飘零。这次不是由于金融风暴，也不是由于经济危机，更不是由于天灾，而是被一项技术打败，一项他自己发明的技术！这使人们自然而然地想到美国好莱坞大片中的情景，科学家被自己研制出的机器人或“怪兽”吞噬！这个“怪兽”就是数字摄影技术。

1975 年，柯达发明了世界上第一台数码相机，从而开创了以硅代替胶片的数字摄影时代。如今，很多人的生活已离不开它，最近发生的许多热点问题，都与手机等数字摄影设备拍摄下来的照片或视频密切相关。所以说，数字摄影技术已经深入应用在人类社会活动的许多方面，而在数字摄影技术基础上发展起来的计算摄影学将为这场变革掀起更大的波澜。毫无疑问，变革还只是刚刚开始！

## 1.1 计算摄影学的起源

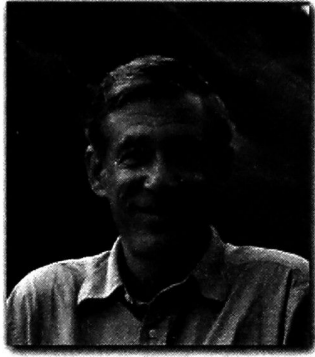
计算摄影学是 Computational Photography 的英译。这个词起源于学术界对光场技术的研究。所谓光场，即 Light Field，是指描述光在空间中传播的每一个方向和经过的每一个点的函数。光场的概念最初是由英国著名物理学家、化学家迈克尔·法拉第（见图 1-1）于 1846 年提出的，法拉第认为光应该像电一样，也可以用场来描述。

1936 年，Arun Gershun 在一篇论文中创造了“Light Filed（光场）”一词，用于描述光在三维空间的辐射特性。1996 年，斯坦福大学的 Marc Levoy 和 Pat Hanrahan（见图 1-2）把光场一词引入计算机图形学，他们基于光场提出的应用是基于图像的绘制（Image Based Rendering, IBR），即在不需要场景结构信息的情况下，可以从已知的视点位置观察到的场景，合成出新的视点位置上观察到的场景。

1996 年之后，研究人员从理论与实践两方面开展了光场的研究。在理论方面，研究人员对光场抽样进行了空间域和频率域分析，提出了几种新的光场参数法方法，包括表面光场和非结构化 Lumigraph。在实践方面，研究人员实验了很多种采集光场的方法，包括摄像机阵列、微棱镜、万花筒等。斯坦福大学计算机图形实验室在光场研究过程中，主要集中在如何设计或引入各类高性能成像设备为光场研究服务。经过一段时间研究，他们发现光场这个词已经不能够涵盖他们的研究内容，于是 Computational Photography 的概念就被提出。2005 年 5 月，麻省理工学院、斯坦福大学、微软研究院的研究人员在麻省理工学院召开了首届计算摄影学研讨会。由于数字摄影技术在 2005 年后的飞速发展，特别是基于手机的数字摄影技术的井喷式普及，计算摄影学获得了学术界和工业界



图 1-1 提出光场概念的  
迈克尔·法拉第



(a) Marc Levoy 教授



(b) Pat Hanrahan 教授

图 1-2 首次把光场引入计算机图形学的两位教授

的极大重视,得到了快速发展,研究范畴已远超越光场,成为一个热点研究领域。自 2009 年,每年举办一届 IEEE 计算摄影学国际学术会议。在国际上,计算摄影学领域代表性的学术研究机构包括麻省理工学院、斯坦福大学、哥伦比亚大学、微软研究院、北卡罗来纳大学和卡内基梅隆大学等,并开设了相关研究生课程。

## 1.2 计算摄影学的相关概念

前面讲过,计算摄影学的概念早已突破光场的研究范畴,广义上说,它是在数字摄影学(Digital Photography)的基础上,增加对成像过程与设备的精确控制,对影像更加复杂的处理与计算,并使用 3D 成像、全景处理等新颖的数字媒体处理技术,从而在成像过程中彻底引入计算单元的一套理论、方法与技术。

按照这种观点理解,大多数人对计算摄影学就一点都不陌生了,今天大多数人用的数码相机和手机都含有计算摄影的技术,如光学防抖、人脸识别、宽动态、自动白平衡、全景拼接等。

对计算摄影学有如下不同的定义。

### 1. Wikipedia 的定义

计算摄影学是指基于计算设备的图像采集、处理、操作技术,以增强或拓展数字摄影的能力。<sup>[1]</sup>

### 2. Ramesh Raskar 的定义

麻省理工学院媒体实验室的 Ramesh Raskar 副教授在 *Computational Photography: Mastering New Techniques for Lenses, Lighting, and Sensors* 一书中对计算摄影学是这样定义的:“计算摄影学组合了大量计算、数字传感器、现代光学、传动装置和智能照明设备,以突破传统胶片式摄像机的局限,创造出一些新颖的摄影应用。”<sup>[2]</sup>

### 3. Marc Levoy 等人的定义

斯坦福大学 Marc Levoy 教授等在其开设的计算摄影学课程中对计算摄影学是这样定义的：“计算摄影学广义上是指用于增强或扩展数字摄影能力的感知策略和算法技术，这些技术的输出是一张正常的照片，但可能不是采用传统的照相机拍摄的，代表性的技术包括高动态成像、编码光圈与编码曝光成像、结构光摄影、多透视与全景拼接、数字蒙太奇、全聚焦成像和光场成像等。”<sup>[3]</sup>

### 4. Alexei (Alyosha) Efros 的定义

卡内基梅隆大学的 Alexei (Alyosha) Efros 教授在其开设的计算摄影学课程中对计算摄影学是这样定义的：“计算摄影学是融合计算机图形、计算机视觉和摄影学而创造出的一种新的研究领域。它的作用是通过使用计算技术，突破传统照相机的诸多限制，产生出对我们现实视觉世界一种更丰富、更生动、认知上也许更有意义的表达。”<sup>[4]</sup>

### 5. Peter N. Belhumeur 的定义

美国哥伦比亚大学的 Peter N. Belhumeur 教授在其开设的计算摄影学课程中对计算摄影学是这样定义的：“最近几年，计算机图形、计算机视觉和摄影学的领域交叉融合产生了一种新的、很活跃的研究领域——计算摄影学。计算摄影学的目标是使用计算技术重新定义照相机，以产生一种新形式的图像和视觉表达。”<sup>[5]</sup>

### 6. James Hays 的定义

美国布朗大学的 James Hays 在其开设的计算摄影学课程中是这样定义计算摄影学的：“计算摄影学描述了计算机图形、计算机视觉、因特网与摄影学的交叉融合。它的目的是使用计算技术来克服传统的摄影学局限性，以增强我们采集、操纵和交互视觉媒体的方式。”<sup>[6]</sup>

从上述定义不难总结出，计算摄影学是对数字摄影能力的增强和扩展，集成了现代光学、计算机图形学、计算机视觉、因特网与摄影学等多学科知识，把计算技术引入到传统摄影学中，以创造出各种新颖应用的新的学科。

狭义上讲，计算摄影技术就是计算摄影学中涉及的大量关键技术。广义上讲，计算摄影、计算摄影技术、计算摄影学三个词的含义是一样的，是同一个英文词组 Computational Photography 在不同语境中的不同表达。

那么，计算摄影技术与数字摄影技术这两个概念如何区分呢？数字摄像技术是以 CCD/CMOS 数字感光器件代替胶卷为起点而对传统照相机进行改造所涉及的一系列技术，包括自动曝光技术、自动白平衡技术、图像压缩技术、3D 降噪技术等。光学镜头与数字感光器件是数码相机的两大主要部件，而光学镜头与胶卷是胶片相机的两大主要部件。数字摄像技术与传统摄像技术相比，整体结构没有发生很大变化，只是由胶卷换成了数字感光器件。而计算摄影技术则是在数字摄影技术的基础上，对摄影技术做出的很大变革，光学镜头、曝光方式、聚焦方式乃至相机所成的图像都完全不同。

## 1.3 计算摄影学涉及的研究领域

计算摄影学的研究领域包括以下几个方面。

### 1. 摄像机结构与图像形式化

对摄像机结构与图像形式化 (Camera and Image Formation) 理论的研究属于计算摄影学基础理论研究范畴。相关理论的突破会导致计算摄影技术上的飞跃。

### 2. 人类视觉认知

人类视觉认知 (Human Visual Perception) 的研究涉及生理学、心理学以及信息科学,也是计算摄影学的基础研究课题。

### 3. 图像金字塔、梯度场与双边滤波

图像金字塔、梯度场与双边滤波 (Image Pyramid, Gradient and Bilateral Filter) 是与计算摄影学相关的图像处理技术,是视频压缩、降噪、运动估计等相关算法的基础。

### 4. 颜色、白平衡、Bayer 模式与去马赛克

颜色 (Color) 模型是图像与视频的基础,也是白平衡 (White Balance) 处理的基础,Bayer 模式是 CMOS 感光器件输出的原始信号,用于显示、压缩与存储的视频或图像一般是 RGB 或 YUV 格式,这就需要利用去马赛克处理 (Bayer Pattern and Demosaicing) 把 Bayer 模式的信号转换为 RGB 或 YUV 信号,并尽可能保持画面的层次感和亮丽程度。

### 5. 计算光照

计算光照 (Computational Illumination) 是指以结构化的模式控制光照,以得到特殊效果的图像,通过处理图像,实现图像增强、图像去模糊以及被摄场景结构恢复等操作。

### 6. 编码光圈与编码曝光

编码光圈 (Coded Aperture) 是将特定模式的掩膜放置在照相机的光圈前,照相机可拍摄到一幅全模糊的图像,通过特定的算法可以把图像恢复成全清晰的图像。编码曝光 (Coded Exposure) 是指按特定的模式控制摄像机的曝光时间长短,摄像机曝光时间长,在低照度环境中依然能够拍摄到明亮的画面,但容易产生运动模糊,曝光时间短,不会产生运动模糊,但画面较暗,通过摄像机曝光时间长短的不同搭配,有可能得到没有运动模糊的明亮画面。

### 7. 自动聚焦

自动聚焦 (Auto Focus) 是照相机和摄像机中十分重要的一项功能。如果自动聚焦不好,拍摄出的画面就会产生模糊,再高分辨率的画面或再亮丽的画面也无法看清楚。虽然自动聚焦算法已经被研究很多年,在照相机和摄像机中也应用了很多年,但相关的

技术还需要研究，特别是在低照度环境或弱纹理环境下，如何准确自动聚焦依然是需要解决的问题。

### 8. 去运动模糊与去散焦模糊

当曝光时间较长时，拍摄运动物体会产生运动模糊。当照相机聚焦不好时，画面会产生散焦模糊。有运动模糊或散焦模糊的图像或视频需要采取特殊的算法——去运动模糊与去散焦模糊算法（Motion Deblurring and Defocus Deblurring）才能把它们变得清晰。

### 9. 高动态成像

动态范围表征图像中最亮的亮度值与最暗的亮度值之间的变化范围。比如，人们对窗户拍摄，动态范围高的照相机拍摄出的画面既可以看到室外的场景，也能看清室内的场景。如何得到高动态成像（High Dynamic Range Imaging），或叫宽动态成像（Wide Dynamic Range Imaging），是计算摄影学领域当前研究的热点之一。

色调映射技术（Tone Mapping）是高动态成像经常采用的技术（见图 1-3），在左边图中，中间区域太亮了，而上边区域太暗了，如果采用色调映射技术，可以对光线进行处理，使得既能看到亮的区域，又能看到暗的区域，得到右边图所示的效果。



图 1-3 色调映射技术的应用<sup>[7]</sup>

### 10. 图像修复

当照片年久失修有残缺时，或数字图像在网络传输中有误码而导致部分像素错误时，图像修复（Image Complete）技术可以把残缺或错误的像素恢复出来。传统图像修复的基本思路是从残缺照片中截取与残缺部分最相近的像素，贴补到残缺部位。如今，这项技术已扩展到通过互联网收集大量的照片集，采用统计的方法从照片集中找到与残缺部分最相近的像素贴补到残缺部位。

### 11. 图像合成

图像合成（Image Compositing）或叫数字蒙太奇技术（数字 Photomontage），比如家庭聚会的照相（见图 1-4），图中上面四张照片中每张都有一些人的面部表情不太合适，在没有计算摄影之前，要反复去拍很多张，挑出合适的一张。在有了计算摄影之后，就可以把四张照片中面部表情比较好的区域运用蒙太奇处理，做出一个合成图像，在这个合成图像中，每个人的表情都达到满意的效果。

### 12. 全聚焦成像

人们知道，普通照相机只能聚焦在场景中的某个距离，超出这个距离一定范围的物体在照相机中不能清晰成像。而全聚焦成像（All-focus Imaging）可以对场景中任何距

离的物体清晰成像。这是一项全新的技术，彻底改变现有照相机的聚焦方式，摄影师不用在拍摄现场聚焦，可以在拍摄完成后任意调整聚焦点。



图 1-4 蒙太奇处理<sup>[8]</sup>

### 13. 多透视全景拼接

一般照相机或摄像机的成像视角在 60°左右，如果需要拍摄到 180°或 360°的高分辨率全景画面，往往会把多幅图像拼接成全景画面，由于每幅图像都是透视图，这种拼接又被称为多透视全景拼接（Multi-Perspective Panoramic Stitching）。

比如要照一个宽景时，可以分别沿着画面左右摇摆拍很多张照片，拼接出一个分辨率高、画面完整、连续的整体性的图像，如图 1-5 所示。

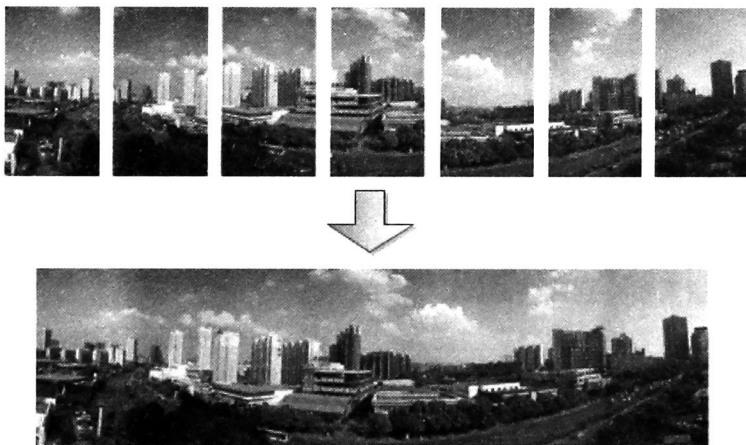
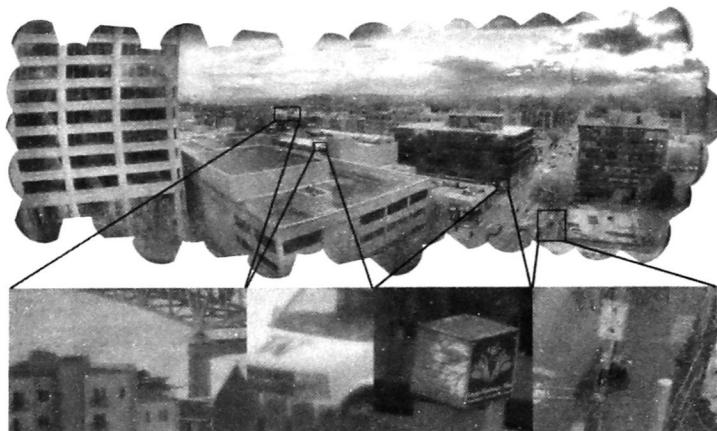


图 1-5 全景图拼接

图像拼接技术可用于构建宽视角超高分辨率的成像系统。在美国国防部先进研究项目局 DARPA 的支持下，杜克大学的研究人员采用图像拼接技术研制出总分辨率达到数十亿像素的实时成像系统 AWARE2，该系统由 98 个 1400 万像素的 CMOS 拼接而成，图 1-6 显示的是该系统拍摄的一幅画面，上图显示的是全貌，下图显示的是某些局部区域的细节场景。该项目被美国媒体评为“美国国防部 20 项有望改变人们生活的军事项目”之一。<sup>[9]</sup>



图 1-6 AWARE2 拍摄出的一幅画面<sup>[9]</sup>

#### 14. 视频总结

随着计算摄影技术的发展，摄像机或带摄像功能的手机成为人们生活的必需品。于是，视频内容越来越庞大，为了对视频内容进行更好的管理，视频总结（Video Summarization）功能就十分必要。所谓视频总结，是指通过分析视频内容，从视频中提取出典型的、有代表性的画面或文字。

#### 15. 光场成像

光场成像（Light Field Imaging）是指能获取光场数据的成像过程。世界上第一台消费级光场照相机是 Lytro 公司于 2011 年 10 月 20 日推出的，如图 1-7 所示。通过光场技术的应用，无论抓拍的照片模糊与否，只要在照相机的焦距范围内，对焦点可以在拍完之后随意选择，因为照相机在拍照时就把焦距范围内所有光学信息都记录在内了。另外，这种照相机拍出来的照片是直接支持 3D 的。Lytro 选用 1100 万像素的 CMOS，采用微透镜技术构建光场。由于一块 CMOS 需要记录光场中的所有光线信息，因而处理后的输出图像像素不会超过  $1200 \times 900$  像素，其分辨率过低。

德国 Raytrix 公司面向工业与科学研究推出的光场照相机 R29 如图 1-8 所示。R29 选用 2900 万像素的 CCD，也是基于微透镜技术构建光场，可得到超过 700 万像素的输出图像。但价格比较昂贵。

图 1-7 Lytro 公司的光场照相机<sup>[10]</sup>图 1-8 Raytrix 公司的光场照相机<sup>[11]</sup>