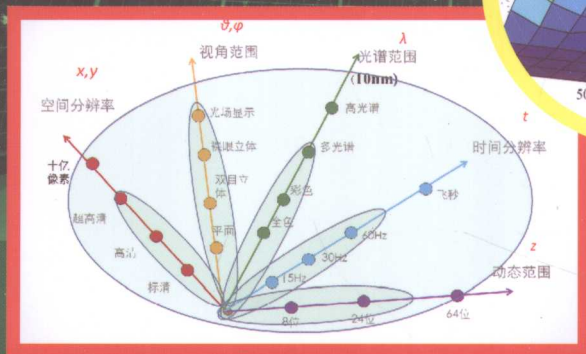
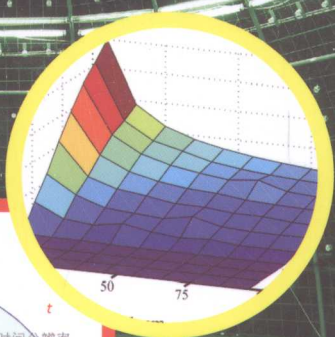
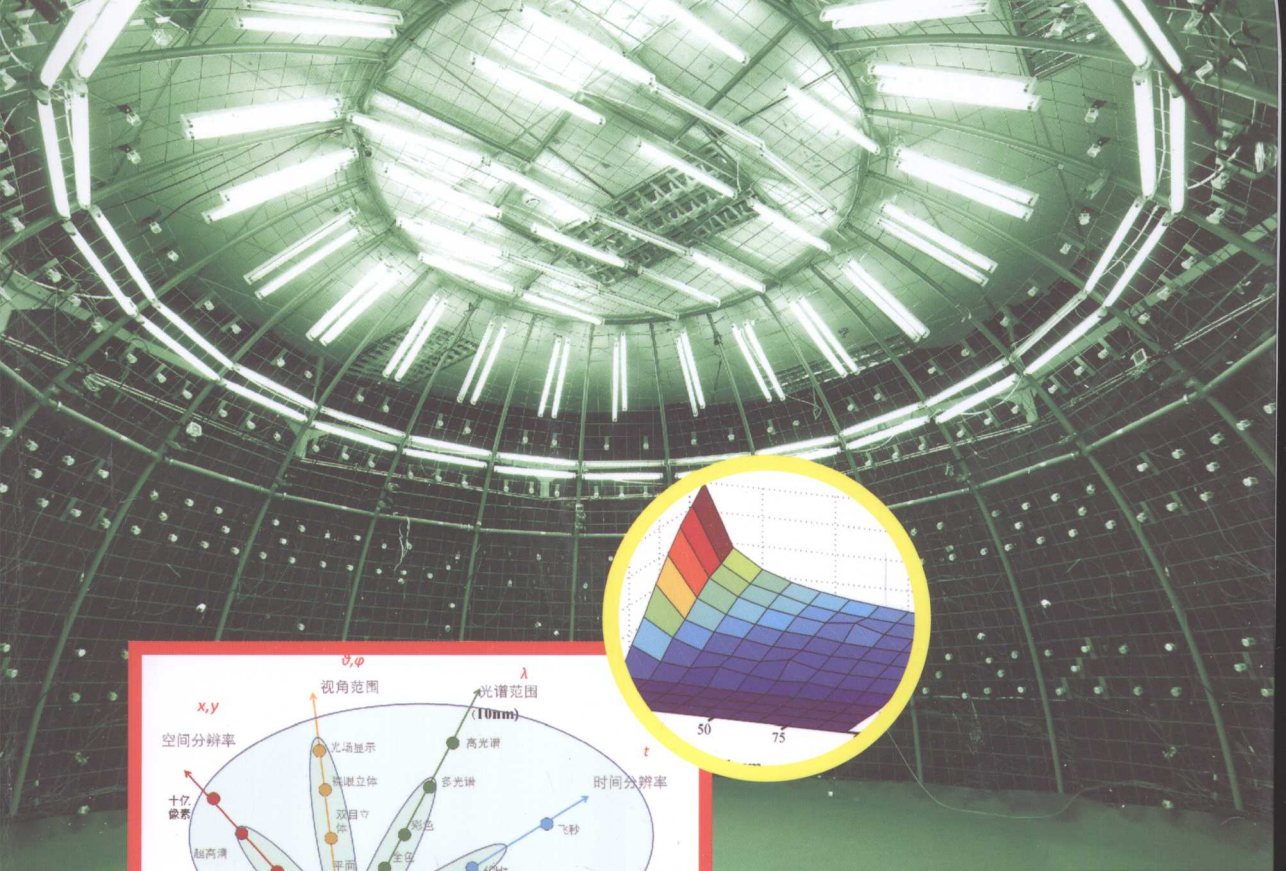




戴琼海 索津莉 季向阳 曹汛 著
Dai Qionghai Suo Jinli Ji Xiangyang Cao Xun

Computational Photography

Computational Capture of Plenoptic Visual Information

计算摄像学

全光视觉信息的计算采集

清华大学出版社



Computational Photography
Computational Capture of Plenoptic Visual Information

计算影像学

全光视觉信息的计算采集

戴琼海 索津莉 季向阳 曹汛 著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

高维视觉信息的采集是计算摄像学的核心内容。本专著以七维全光函数计算采集为主线,围绕空间、角度、光谱、时间等各维度的采集组织若干专题,将清华大学宽带网与数字媒体实验室对此的最新研究成果汇集成册,介绍计算摄像理论与关键技术。

本书面向国内有志从事计算摄像研究的学者,以及与此交叉学科相关的计算机视觉、图形学、计算摄像等学科的同人,希望能对其研究工作有所启迪,也为此交叉学科的发展有所贡献。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

计算摄像学:全光视觉信息的计算采集/戴琼海,索津莉,季向阳,曹汛著. —北京:清华大学出版社,2016

ISBN 978-7-302-42577-9

I. ①计… II. ①戴… ②索… ③季… ④曹… III. ①计算机应用-摄影技术 IV. ①TB8-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 005305 号

责任编辑:王一玲

封面设计:常雪影

责任校对:梁毅

责任印制:宋林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:三河市君旺印务有限公司

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm 印 张:23.25 彩 插:4 字 数:507千字

版 次:2016年9月第1版

印 次:2016年9月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:59.00元

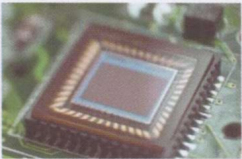
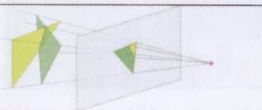
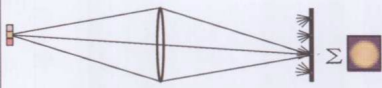
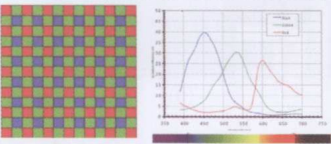
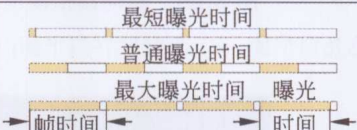
高维视觉信息： $x, y, z, \theta, \phi, \lambda, t$ 7维全光函数				
经典成像模型下的传统相机采样子空间	x, y 高采样能力	$z, \theta, \phi, \lambda, t$ 采样极其受限/无法采样		
	空间分辨率 	深度 z		3维场景投影至焦平面 深度信息丢失
	传感器 CCD/CMOS 2维像素阵列	角度 θ, ϕ		经透镜的各角度光线积分 角度信息丢失
	相机工业的迅速发展使得2维空间分辨率有了极大提升 千万像素级相机已经深入普及 x, y 2维空间采样技术已非常成熟	光谱 λ		RGB三个响应曲线上 光谱积分 仅三个谱点积分离散采样
		时间 t		曝光时间内积分 帧时间离散采样

图 1.2 经典成像模型下高维视觉信息的低维离散耦合采样

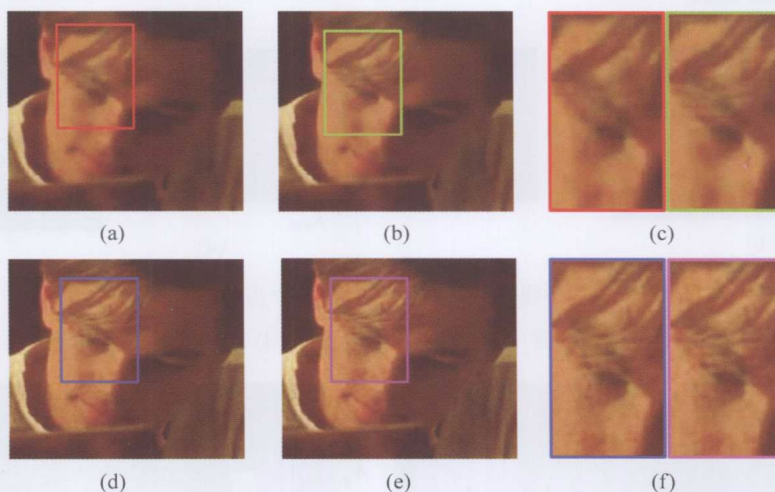


图 2.6 在不同放大系数下的性能比较 (原始分辨率: 160×160 像素; 图像堆帧数: 5 帧; 噪声水平: $\alpha = 0.04$, $\beta = 6.4 \times 10^{-5}$; 重叠部分百分比: 50%; 运行时间: 1685s, 960s, 318s 以及 185s)

(a) 21/5 ; (b) 21/7 ; (c) 细节 1; (d) 21/13; (e) 21/21; (f) 细节 2

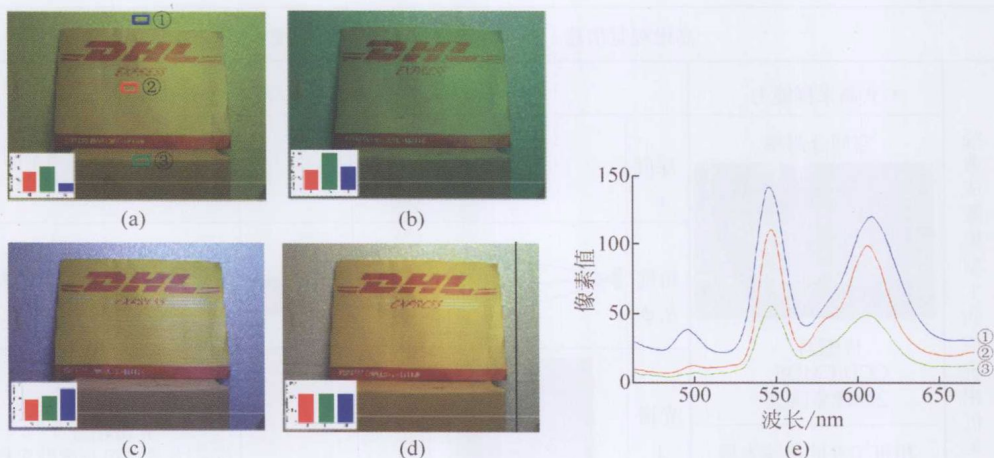


图 3.28 自动白平衡应用

(a) RGB 视频帧; (b) 暖色光白平衡; (c) 灰度世界白平衡; (d) 光谱白平衡; (e) 光谱响应曲线

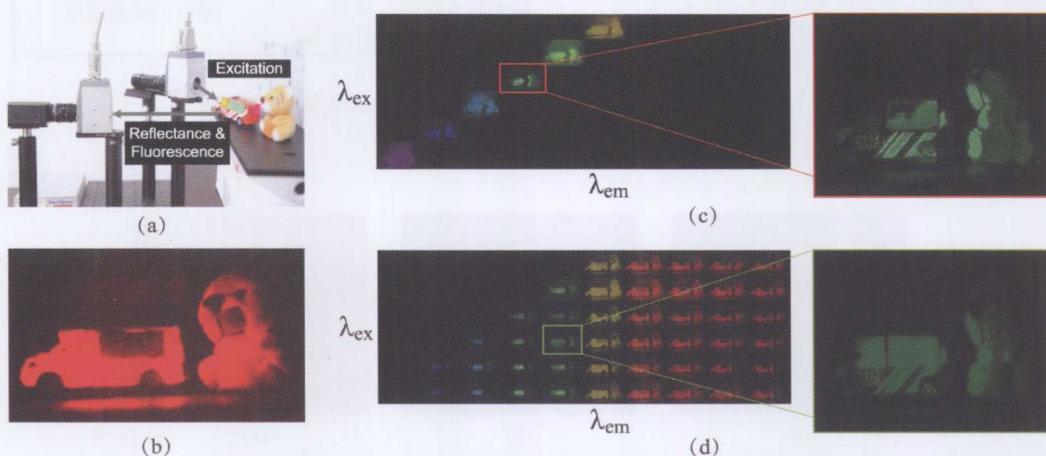


图 3.45 基于我们的方法的系统和一个实验场景下的结果

(a) 硬件系统; (b) 拍摄的其中一张编码图像; (c)、(d) 分别是反射和荧光的重建图

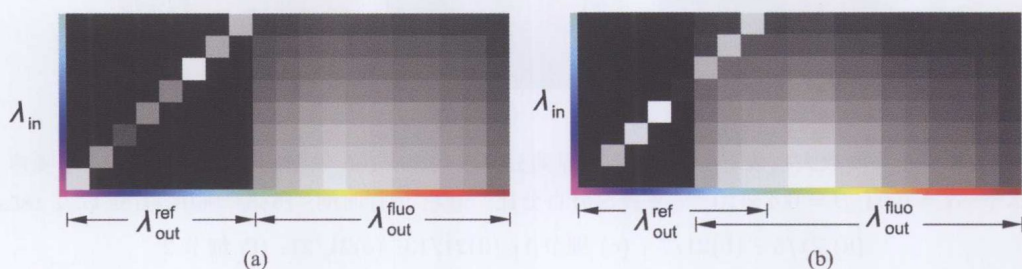


图 3.46 激发 - 发射矩阵的可视化表示。矩阵元素的大小在此用强度表示。水平和垂直方向的色柱分别表示激发源的波长 λ_{in} 和发射源波长，它包括荧光成分 λ_{out}^{flu} 和反射光成分 λ_{out}^{ref}

(a) 激发和发射之间没有重叠; (b) 激发和发射之间有略微重叠

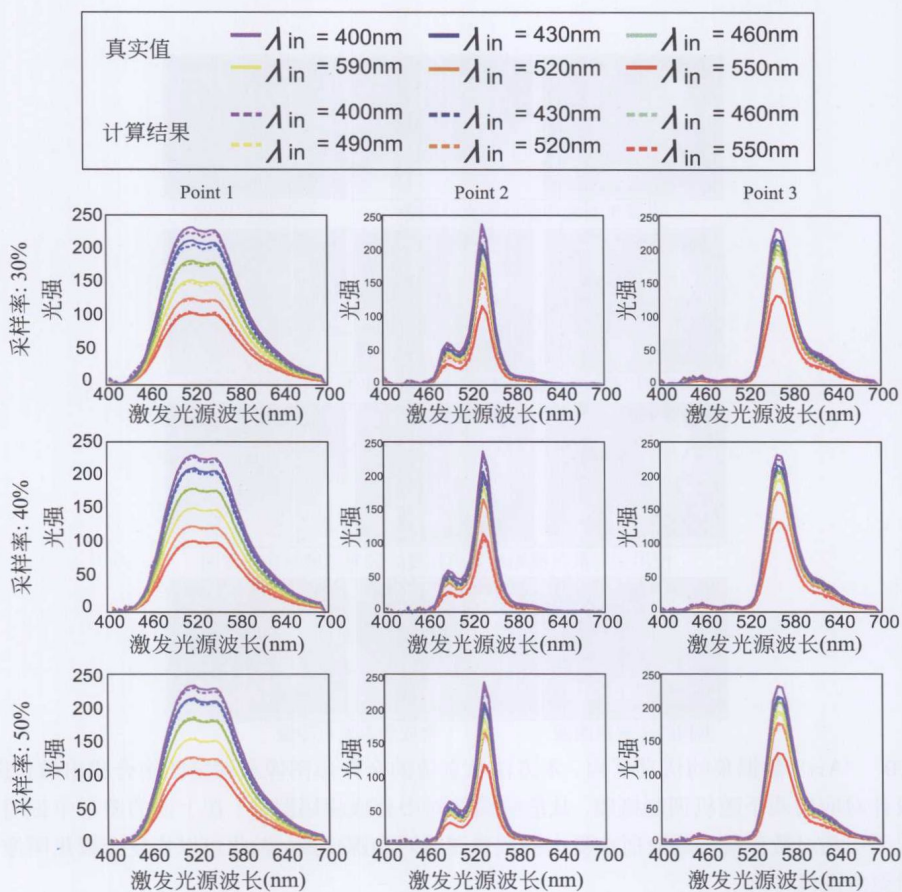


图 3.49 合成数据的结果, 包括三种材料 (水平) 和三种采样率 (垂直)。结果是在五个不同随机编码下运行结果的平均

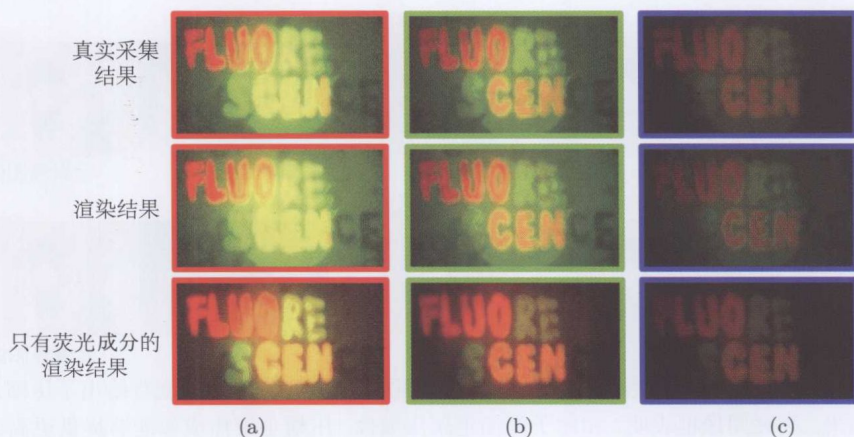


图 3.52 三种不同光源下的二次光照结果和与真实结果的比较

(a) 日光; (b) 钨丝灯; (c) 汞蒸气灯



图 4.19 “Art”数据集的仿真重构。本方法从真值的全聚焦图像和深度图中合成出散焦图像对，然后设计对应的两个随机调制掩膜，从散焦图像对中合成编码图像。在上面的图示中说明了采用以及未采用相对散焦模糊约束所恢复出的散焦图像对和深度图，以此可以恢复全聚焦图像并可以合成重聚焦图像序列



图 4.20 实采数据合成调制实验。顶行显示了间插重聚焦成像的结果，底行给出了压缩采样重聚焦图像结果。高亮图像框表明，相比于间插重聚焦成像，压缩重聚焦成像能够提供更高的空间分辨率并获取更准确的深度和全聚焦图像估计

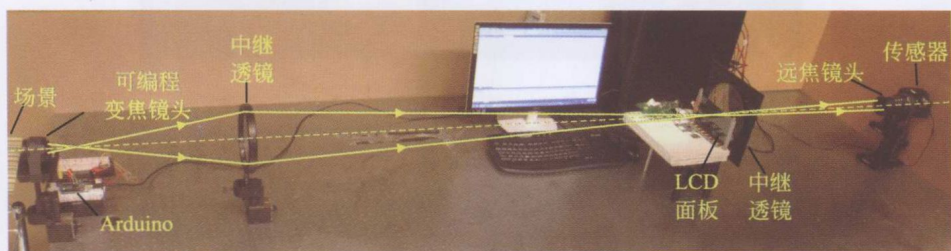


图 4.21 本方法的原型装置及其光路图。本方法使用编程可变对焦的镜头和 LCD 面板来实现重聚焦图像的调制，使用中继镜头和长焦镜头进行视场匹配

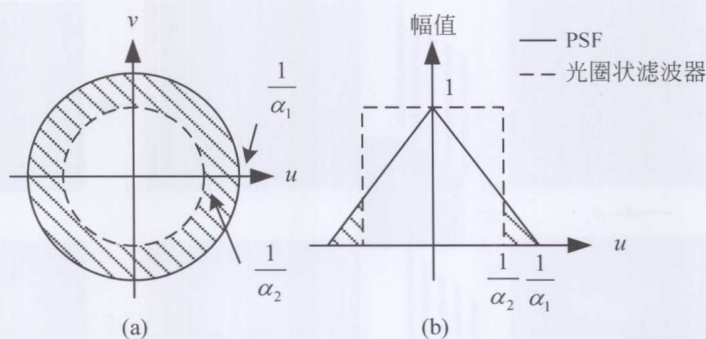


图 4.23 圆形光圈的 PSF 和光圈状滤波器的频域图 (阴影为误差)

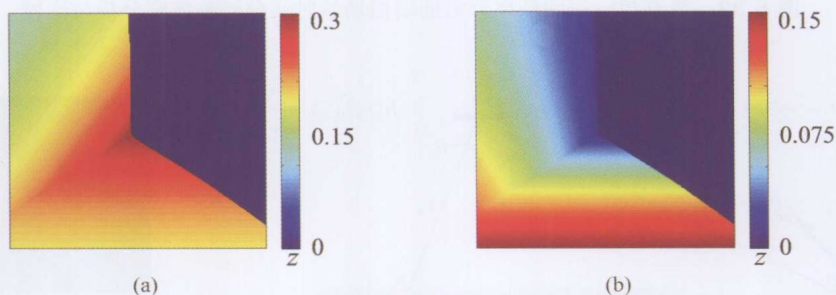


图 6.15 针对仿真 corner 场景的基于直接分量的场景深度计算结果
(a) 相机坐标系下场景深度; (b) 世界坐标系下场景深度

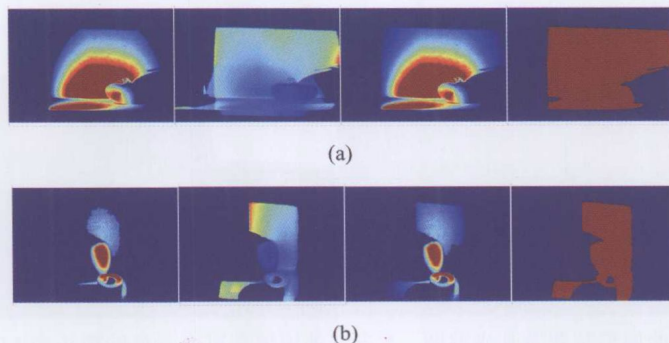


图 6.23 场景直接光照区域提取方法的各步骤结果示例

(a) tomato screen 场景直接光照区域提取示意 (vi); (b) tomato tape 场景直接光照区域提取示意 (v)

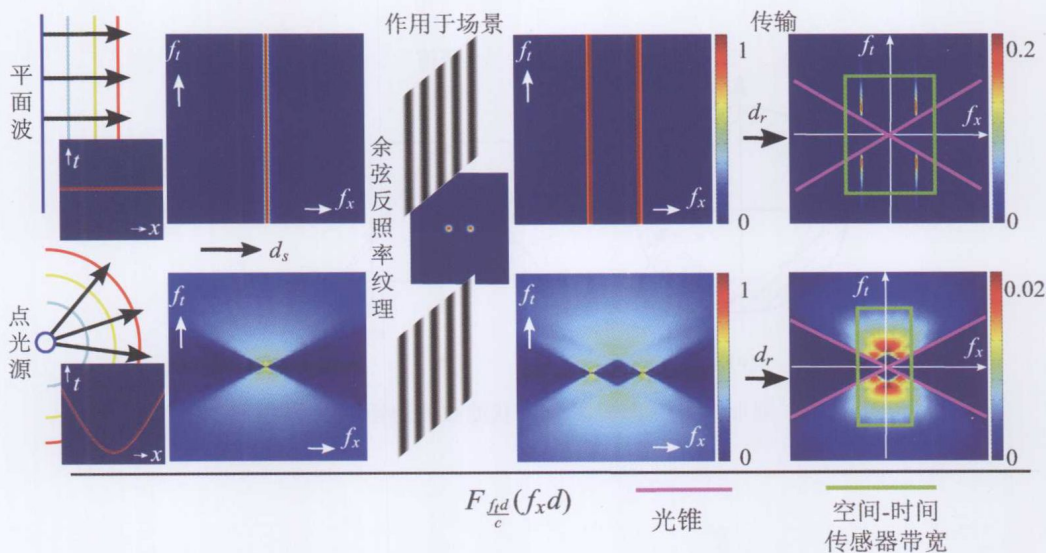


图 6.32 具有单一空间频率分量的朗伯场景时间分辨的带宽分析与比较

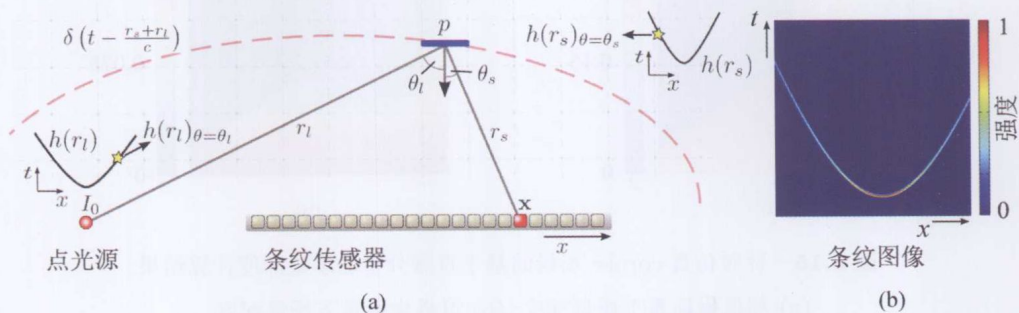


图 6.33 断层扫描场景重构的 1 维示意图

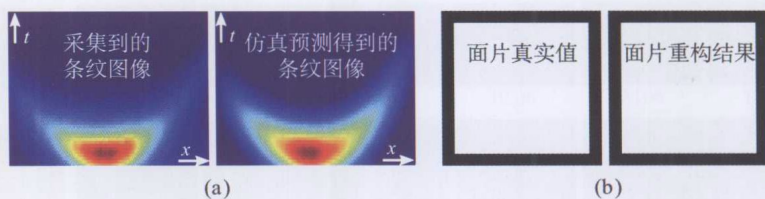


图 6.41 真实数据采集及重构结果：单面片

(a) 真实条纹图像与仿真条纹图像的比较; (b) 重构结果与真实值的比较

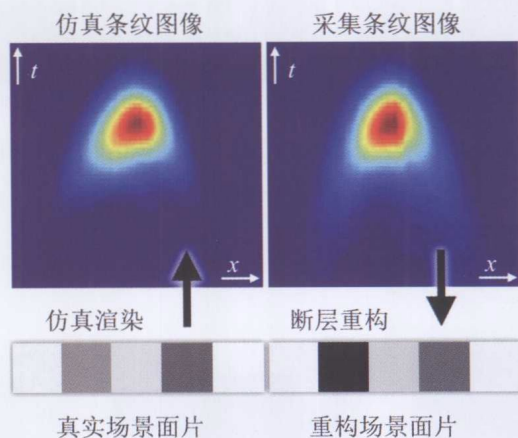


图 6.42 真实数据采集及重构结果：1 维条形码

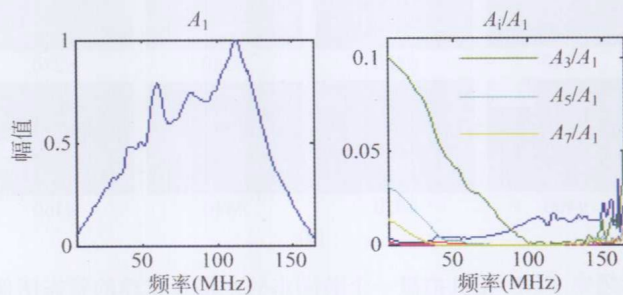


图 6.46 相关函数的各谐波分量的幅值



图 6.54 由文献 [503] 的真实数据 (五组) 重构的暂态图像的若干帧 (每一行对应一组数据, 时间分辨率为 0.33ns)

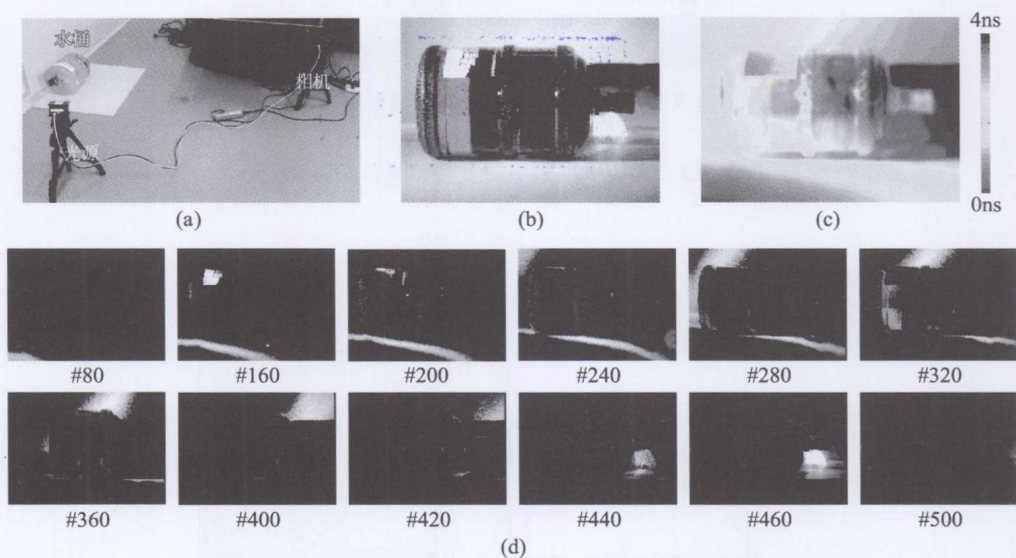


图 6.56 用原型多频率 TOF 相机拍摄一个装满水的水桶及重建的暂态图像的若干帧 (时间分辨率为 0.01ns)



计算摄像学有机结合成像系统的采集能力与计算机的计算能力,实现高维视觉信息的全方位采集,是计算机视觉、图形学、光学、信号处理等深度交叉的新兴学科。该方向的研究于 21 世纪初由斯坦福大学、麻省理工学院、哥伦比亚大学等国际著名研究机构的学者共同发起并蓬勃开展。计算摄像理论与技术打破传统数字图像、视频领域先采集后处理的模式,模糊采集与处理之间的界限,在信号处理理论的指导下将相机采集与计算机后续处理有机结合,在有限的系统采集资源下实现高维视觉信息的耦合采集与解耦重构。计算摄像理论和关键技术以高维高分辨光信息捕获为核心任务,革新成像系统的形式和机制,实现视觉信息的采集,解析场景属性,突破现有相机成像质量的局限,有效扩大视觉信息的后处理空间。计算摄像方法代表未来相机研发的新方向,同时吸引了来自学术界,乃至工业界的广泛关注和极大投入。这一研究方向近年来飞速发展,涌现了大量优秀的科研成果。

清华大学宽带网与数字媒体实验室于 2010 年正式成立计算摄像研究组,在国内率先开展了计算摄像相关的研究。研究组具备计算摄像研究的硬件平台,投入大量的精力,研发新的成像机制、设计并搭建新的成像系统、钻研高性能计算重构方法,围绕全光函数各个维度的计算采样与重构全面系统开展工作。实验室以自主科研、独立创新为主,同时与麻省理工学院、斯坦福大学、加州理工学院等国际顶级研究机构保持密切合作,取得了一系列创新的成果。相关文章发表在计算摄像领域顶级会议以及视觉与图形学领域顶级会议的计算摄像专题,获得了国际同行的高度认可。在知识产权方面,形成了一批具有自主知识产权的关键技术,申请并获得一系列国内、国际专利授权。此外,计算摄像对于成像能力的突破,使得相关成果具有广阔的产业化与应用前景。

这里,我们汇集了清华大学宽带网与数字媒体实验室近年来计算摄像方面的研究成果,希望能够借此为计算机视觉、图形学等相关学科提供新的视角与思路,并推动国内计算摄像学的发展,吸引和鼓励更多的团队加入该新兴领域的研究,为我国在该新兴领域争得

一席之地。作者还希望以此作为契机，为光学、生物医学、天文、对地观测等领域的成像研究提供借鉴，促进科学观测仪器的研发和基础学科的发展。

本书是戴琼海教授所领导的计算摄像学团队的集体成果。戴教授立足国际前沿热点，紧随潮流，率先在国内引入该研究方向。索津莉博士作为实验室计算摄像组负责人参与了本书大部分研究工作。戴琼海教授、索津莉博士与季向阳教授共同参与了本书的组织与撰写。其他参与本书所述研究工作的诸多师生，虽未作为图书作者，但他们的不懈探索和努力工作构筑了本书的主体内容。

本书所介绍的研究工作均在国家自然科学基金委资助下完成，特此致谢其对该领域和我们科研工作的大力支持。作者在此一并致谢参与本书相关科研工作的多位老师、研究生以及国内外合作者，感谢实验室研究生为稿件进行校对。衷心感谢清华大学出版社王一玲编辑，她和她的同事在图书的整个编辑和出版方面付出了大量心血。本书在编撰过程中得到了诸多同行的支持，并给予了許多建设性指导意见，在此我们表示诚挚的谢意。

作 者

2015 年 11 月

第 1 章 计算摄像学背景综述	1
1.1 计算摄像学学科简介	1
1.2 全光函数	3
1.2.1 空间维度	3
1.2.2 角度维度	5
1.2.3 频谱维度	8
1.2.4 时间维度	9
1.2.5 动态范围与极化	16
1.2.6 联合维度采集	17
1.2.7 光的其他特性	18
1.3 本书内容与总述	20
第 2 章 高帧率视频与 3 维结构计算重建	21
2.1 原始高帧率视频的联合非高斯去噪和超分辨率重建	21
2.1.1 介绍	21
2.1.2 相关工作	23
2.1.3 模型建立	24
2.1.4 优化算法	28
2.1.5 实验结果与分析	31
2.1.6 总结与讨论	42
2.2 时间解耦的多视角高速运动计算成像	43
2.2.1 高速运动计算成像相关工作介绍	46
2.2.2 多视角高速运动计算成像的系统构建与采集方法	49
2.2.3 时间解耦的高速运动几何信息计算重构	50
2.2.4 时间解耦的高速运动纹理信息计算重构	54
2.2.5 实验结果与分析	61
第 3 章 高分辨率超光谱视频计算采集	67
3.1 棱镜掩膜式光谱视频捕获方法和系统	67
3.1.1 光谱视频捕获相关工作介绍	68

3.1.2	棱镜掩膜式光谱视频捕获方法	71
3.1.3	棱镜掩膜式光谱视频捕获系统构建	78
3.1.4	实验结果与应用实例	83
3.1.5	总结与讨论	88
3.2	混合相机式光谱视频捕获方法和系统	89
3.2.1	混合相机式光谱视频捕获方法	90
3.2.2	混合相机式光谱视频捕获系统构建	96
3.2.3	实验结果与应用实例	99
3.3	基于混合相机的场景自适应高分辨率高光谱视频采集	105
3.3.1	基于混合相机的自适应式光谱视频采集方法	105
3.3.2	实验结果与应用实例	109
3.4	对偶编码高光谱成像	111
3.4.1	高光谱成像简介	111
3.4.2	对偶编码高光谱采集与重构	112
3.4.3	总结与讨论	117
3.5	双频编码：基于压缩感知的高质量的荧光及反射光的获取	118
3.5.1	引言	118
3.5.2	相关工作	120
3.5.3	建模	121
3.5.4	优化	124
3.5.5	实验结果与分析	126
3.5.6	总结与讨论	131
第 4 章	高分辨率自由景深计算采集	132
4.1	散焦视频对同时重构深度和全聚焦视频	132
4.1.1	散焦深度重构介绍	132
4.1.2	相对散焦模糊深度视频初始化	136
4.1.3	时空联合优化深度和全聚焦视频	139
4.1.4	多散焦视频的联合散焦去模糊	139
4.1.5	时空联合优化数值解法	140
4.1.6	实验结果与分析	142
4.1.7	总结与讨论	152
4.2	编码重聚焦成像	152
4.2.1	场景重聚焦介绍	152
4.2.2	场景重聚焦技术背景	154
4.2.3	单曝光编码重聚焦采集和重构	156

4.2.4	稀疏编码重构深度和全聚焦图像	158
4.2.5	实验结果	162
4.2.6	分析讨论	164
4.2.7	总结与讨论	165
4.3	基于散焦线索的单目立体成像	165
4.3.1	引言	165
4.3.2	光圈状滤波器的基本原理	166
4.3.3	深度估计	170
4.3.4	实验结果与分析	171
4.3.5	总结与讨论	175
第 5 章	模糊图像的计算重建	177
5.1	基于对齐互补模糊图像对的图像去模糊算法	177
5.1.1	对齐互补模糊图像对的采集	177
5.1.2	求解算法	183
5.1.3	实验结果与分析	187
5.1.4	总结与讨论	191
5.2	基于近红外闪光图像辅助的图像去模糊算法	192
5.2.1	引言	192
5.2.2	近红外图像梯度约束	193
5.2.3	空间一致运动去模糊算法	197
5.2.4	空间变化运动去模糊算法	202
5.2.5	实验结果与分析	208
5.3	运动空变模糊图像的计算恢复	224
5.3.1	背景介绍与相关研究	224
5.3.2	多自由度运动投影模糊模型	227
5.3.3	高维概率运动密度函数	229
5.3.4	概率运动密度函数引导下的空变模糊图像恢复	234
5.3.5	实验结果与分析	236
5.3.6	总结与讨论	250
第 6 章	暂态成像理论、采集与光传输解耦	251
6.1	时间解析的全局光传输解耦计算成像	251
6.1.1	光传输分析与应用的相关工作介绍	253
6.1.2	光传输分量及其物理建模	254
6.1.3	时间解析的全局光传输分解	258

6.1.4	时间解析光传输解耦与分析的应用	271
6.1.5	实验结果与分析	276
6.1.6	总结与讨论	281
6.2	暂态光传输下的超快无镜头计算成像	282
6.2.1	光传输频域分析及无镜头成像系统的相关研究	284
6.2.2	时间解析的暂态光传输频域分析	286
6.2.3	交叉维度信息传输及空间 - 时间带宽分析	291
6.2.4	时间解析的超快无镜头计算成像方法及性能分析	293
6.2.5	实验结果与分析	297
6.2.6	总结与讨论	302
6.3	频域暂态成像	303
6.3.1	引言	303
6.3.2	基于 TOF 原理的暂态成像分析	304
6.3.3	相关函数标定	310
6.3.4	频域暂态成像的流程	312
6.3.5	图像集修正	312
6.3.6	暂态图像重构	315
6.3.7	算法复杂度分析	317
6.3.8	实验结果与分析	318
6.3.9	总结与讨论	326
	参考文献	327