



CRC Press
Taylor & Francis Group

Advanced High
Dynamic Range Imaging:
Theory and Practice

高动态范围成像高级教程 理论与实践

(美) 弗朗西斯科·班特利 等 著
芦碧波 郑艳梅 王永茂 译

非外借

清华大学出版社

高动态范围成像高级教程： 理论与实践

(美) 弗朗西斯科·班特利 等著

芦碧波 郑艳梅 王永茂 译



清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书详细介绍了高动态范围图像相关的基本知识和处理技术, 主要包括高动态范围图像处理流程、高动态范围图像的生成方法、高动态范围图像显示的色调映射技术、低动态范围图像的展开技术、基于图像的光照、高动态范围图像相关技术的评价方法、高动态范围图像和视频的数据压缩技术等内容。此外, 本书还提供了多种典型算法的代码, 以帮助读者进一步理解高动态范围图像处理的实现过程。

本书适合作为高等院校计算机、颜色科学、印刷及相关专业的教材和教学参考书, 也可以作为相关开发人员的自学教材和参考手册。

Advanced High Dynamic Range Imaging: Theory and Practice 1st Edition/by Francesco Banterle, Alessandro Artusi, Kurt Debattista, Alan Chalmers/ISBN:978-1-56881-719-4

Copyright © 2011 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved;

本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版, 并经其授权翻译出版。版权所有, 侵权必究。

Tsinghua University Press is authorized to publish and distribute exclusively the **Chinese(Simplified Characters)** language edition. This edition is authorized for sale throughout **Mainland of China**. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体翻译版授权由清华大学出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2014-3940

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

高动态范围成像高级教程: 理论与实践/(美) 弗朗西斯科·班特利(Francesco Banterle)等著; 芦碧波, 郑艳梅, 王永茂译. —北京: 清华大学出版社, 2018

(书名原文: Advanced High Dynamic Range Imaging: Theory and Practice)

ISBN 978-7-302-48447-9

I. ①高… II. ①弗… ②芦… ③郑… ④王… III. ①计算机图形学 IV. ①TP391.411

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第240358号

责任编辑: 苏明芳

封面设计: 刘超

版式设计: 魏远

责任校对: 马子杰

责任印制: 李红英

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

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62788903

印 装 者: 三河市金元印装有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×230mm

印 张: 16

字 数: 317千字

版 次: 2018年5月第1版

印 次: 2018年5月第1次印刷

印 数: 1~2000

定 价: 89.00元

译者序

高动态范围 (High Dynamic Range, HDR) 成像是近年来颇受关注的一个新兴领域。传统数字图像多为低动态范围图像, 是对真实世界光照亮度处理后量化为 8 位整型数据的结果, 因此对于单通道图像而言, 低动态范围图像在理论上最多可以描述 2 的 8 次方, 即 256 种亮度变化。世人皆知, 自然界的亮度变化远非 256 种, 因此传统低动态范围图像只是对客观物理世界光照值简化的记录方式。简化到何种程度呢? 回想一下我们少儿时代学到的关于非负整数和非负小数的区别便略知一二, 但请不要忘记, 低动态范围图像所用的只有从 0~255 这 256 个非负整数。

高动态范围技术采用浮点数记录数据。无论光照和物体是极亮的还是极暗的, 高动态范围技术都可以对它们进行精确表示, 这也是高动态范围成像技术与传统成像技术的最大区别。高动态范围成像技术第一次赋予我们获取和使用真实光照亮度的能力, 从这个意义上讲, 高动态范围成像在人类历史上是一个不小的进步。由于宽广的动态范围, 高动态范围成像目前在虚拟现实、视觉特效、消费电子、视频游戏、印刷包装等领域得到广泛的关注和应用。

至少有 3 类人比较关注这一领域的进展。第一类是摄影发烧友, 希望借助高动态范围数据, 利用商业软件创作出美轮美奂的影像作品。第二类是工业界的公司和厂商, 希望提高产品的视觉效果, 为消费者提供更好的视觉体验。如今高动态范围技术已经成为智能手机和高清电视的新卖点, 相关标准的制定工作据悉也正在稳步推进。第三类是国内高校和科研院所的研究人员, 他们已经在此领域做了较为深入的研究, 也取得了重要的进展。遗憾的是, 国内市面上关于高动态范围的中文书籍大都是从摄影的角度出发介绍高动态范围成像的, 鲜有关于高动态范围专业技术方面的著作。译者机缘巧合接触了本书的英文版本, 希望斗胆一试将其译为中文, 为高动态范围知识传播尽自己的绵薄之力。

全书内容全面, 介绍通俗易懂。同时为大部分算法提供了完整的 MATLAB 代码, 便于自学和研究。本书共分为 7 章, 第 1 章和第 2 章介绍高动态范围的基础知识, 其余 5 章分别介绍色调映射、展开算子、基于图像的光照、质量评估、数据压缩等内容。第 3 章色调映射所占篇幅最多, 这也是当前研究较多的内容, 考虑如何将 HDR 数据的动态范围进行压缩, 在低动态范围显示器上高质量再现 HDR 图像的画面。第 4 章介绍的展开算子考虑了与色调映射几乎相反的问题: 如何将低动态范围 (Low Dynamic Range, LDR)

图像展开后高质量地显示在 HDR 显示器上。第 6 章介绍了 HDR 在基于图像的光照方面的应用。第 7 章主要讨论如何评判色调映射算子的优劣。第 7 章主要研究如何压缩 HDR 数据中的冗余。

本书的翻译分工如下：芦碧波负责翻译第 1 章和第 3 章，郑艳梅负责翻译第 2 章、第 4 章和第 6 章，王永茂负责翻译第 5 章和第 7 章。研究生李祎、王建龙、陈静、李玉静、张方利、岳向江、刘利群、李阳、刘甜甜、王乐蓉、李绍森等也参与了相关资料的整理工作。

本书在翻译过程中受到了国家自然科学基金和河南省教育厅科学技术重点项目的资助，同时译者也感谢河南理工大学计算机科学与技术学院的资助和支持。

由于时间仓促，译者水平有限，且此领域涉及数字图像处理、计算机图形学、色度学等方面的知识，书中难免存在疏漏，敬请各位读者和专家指正。

译 者

前言

光线从物体发出进入我们的眼睛，人类以此感知外部世界。人类也期望有一种技术，可以有效模拟光束进入人眼的过程，这样才能直接感知场景的原貌。摄影学和计算机图形学都考虑图像生成问题，也都需要处理可见光成像中的高动态范围问题，但传统的摄影术与计算机图形学处理的方式却不尽相同。研究人员在过去十年中的研究工作已经统一了这两个学科，并且创造了强大而崭新的工具，可以生成令人赞叹的复杂真实感图像。因此从某种意义上讲，高动态范围成像是摄影技术和计算机图形学结合的产物。本书是高动态范围成像的一本实用教程，向读者深入介绍这一新兴学科。

历史上，传统的湿版摄影术需要精心设计相机光学、小心地处理胶卷材料，方可记录处理高动态范围场景，并生成与真实场景视觉感知相同的图像。此外，还需要摄影师在暗室中进行艺术调整才能完成整个成像过程。上述流程中，到达胶卷的入射光与成像材料中化学物质之间的关系非常复杂，因此湿版摄影术并不适于光线测量。

早期的计算机图形学也设计了精妙的算法解决物理方面的两个限制——一个是模拟光线传播时计算能力不足的限制，另外一个显示设备动态范围过窄的限制。为解决计算能力不足的问题，研究人员使用 Phong 反射算法等简单启发式算法模拟显示物体外貌。恰当设计启发式算法可以得到适用于较窄动态范围设备的图像。直到 20 世纪 80 年代早期，随着计算能力的提升，我们方可全面模拟简单场景的照明。

在 20 世纪 80 年代中期，我与当时还未命名的高动态范围成像技术发生了第一次邂逅。当时我正在研究一个特殊的照明模拟方法——辐照度模拟。我所在的研究小组正在设计实验，以说明经冗长计算得到的照明模拟效果要优于启发式方法得到的结果。起初，研究小组中的一些研究人员认为，只需要对显示模拟图像的计算机屏幕成像，然后将它与真实场景图像进行对比，就可以表明模拟的图像更加精确。当时采用的场景非常简单，后人将此场景称为 Cornell 盒子，场景为一个中空立方体，立方体内有一堵蓝墙、一堵红墙和一堵白墙，当然还有地板和天花板，天花板顶部有一个光源。实验中，我们很快遇到了复杂的胶片处理问题。例如，从钨灯光源发出的通红的光经白色表面反射后，在胶卷上看起来是红色的——如果对于图像、计算机屏幕和 Cornell 盒子使用同样的胶卷。研究小组中的资深成员 Gary Meyer 当时正在撰写关于计算机图形学中颜色方面的博士论文，他耐心地向我们解释光从入射到记录为影像数据的整个过程是多么复杂。

由于无法将图像与照片进行比较，当时也没有数码相机，我们只能直接使用光度计测量范围十分广泛的波长和入射角。由于上述方案仅能粗略测量光照模拟的精度，因此我们换了另外一个思路：请受试者直接在计算机屏幕上观看模拟图像，并与通过相机观察到的真实场景进行对比，通过相机观察实景是为了消除三维信息对感知的影响。但是，由于直视光源削弱了对真实场景和模拟场景的感知能力，因此我们遇到了高动态范围问题。我们期望二者看起来一样，但同时显示亮红色钨灯光源和经线性映射后的模拟图像严重破坏了人类视觉的颜色恒常性。我们当时采取的权宜之计是在两个场景中简单地挡住对光源的直视。研究结果表明，我们的模拟结果优于先前的启发式算法，但上述结论仅对有限动态范围图像成立，之后我们也并未对高动态范围图像情形展开深入研究。

经 20 世纪 80 年代和 90 年代的发展，照明模拟问题在效率和技术上愈加成熟。随着 Greg Ward 的辐照度等精确全局照度软件的发布，大范围照明模拟变得可行。用户已经满足于随意缩放和剪裁计算所得数据，然后将高动态范围数据映射为低动态范围数据，并在阴极射线管 CRT 显示器上进行显示。工程师 Jack Tumblin 当时的工作是在飞行模拟器上显示高动态范围图像。一个偶然的的机会，他开始研究计算机图形学中的照明模拟问题，并假设存在一个原理，可将物理照明值映射到计算机图形学设备上。当发觉这一原理并不存在后，他开始学习摄影和电视方面的知识，并挖掘这两个领域在图像获取和显示设备设计中关于人类视觉感知方面的工作，进而提出了计算机图形学中的第一个色调映射算法。在 20 世纪 90 年代末，研究人员提出另外一类色调映射算法，并考虑将它们应用在图像合成问题中以提高全局照明计算效率。

在 20 世纪 80 年代和 90 年代，数字图像记录技术稳步发展，设备价格不断降低且使用起来非常方便。计算机视觉和计算机图形学的研究人员，如伯克利的 Paul Debever 和 Jitendra Malik 开始进行实验。他们改变相机曝光时间并生成一组图像，然后将它们合并为真正的高动态范围图像，从而精确记录了入射光值。这种技术具有计算和捕捉真实光值水平的能力，并为我们开启了统一计算机图形学和计算机视觉的大门。使用合成图像生成具有良好照明效果的真实感图像只是它的诸多应用之一，而使用摄影术捕捉真实照明和材质并将其应用于图像合成也是计算机图形学中一个典型应用。

数字摄影和精确照明模拟统一后，研究人员开始继续探索并尝试解决诸多新问题。随着研究的不断深入，人们发现寻求最优解只是色调映射问题的冰山一角，此领域中存在一系列问题亟待解决，解决这些问题的目的不尽相同：或旨在为观察者呈现与真实场景视觉效果相同的图像，或尽可能突出显示图像中的重要细节。同时，色调映射还要考虑动态场景和低光照条件等外界环境的影响。对于现存的大量低动态范围图像，如何将

其展开使之在高动态范围显示环境下显示？何种技术可以有效压缩与日俱增的高动态范围成像数据？如何评价图像显示的一致性？

本书对高动态范围成像这一激动人心的新兴领域进行了详尽介绍。书中还给出相关算法的公式和对应代码，利用这些资料，读者可以自己动手，生成令人叹为观止的图像。

Holly Rushmeier

耶鲁大学

序 言

人类拥有卓越的人类视觉系统 (Human Visual System, HVS), 具备自适应处理光线的能力, 因而可以轻松感知真实世界中宽广的亮度范围: 不仅能够看清星光下的夜空, 也能清晰分辨明媚天空中的颜色和细节。1826 年, Joseph Nicephore Niepce 在人类历史上第一次生成了可以永久保存的照片, 但在此之前, 相机生产厂商和摄影师已经致力于使相机能够捕捉与人眼所见一致的细节。尽管 James Maxwell 和 Thomas Sutton 早在 1861 年就拍摄了第一张彩色照片, 19 世纪 20 年代人们发明了电子摄像机, 但如何同时捕捉人眼在连续自适应情况下观察到的所有亮度范围, 仍然是一个很大的挑战。在 2009 年的 ACM SIGGRAPH 会议上, 德国高精度相机制造商 Spheron VR 和英国 Warwick 大学国际数字实验室联合展示的 Holy grail 视频摄像机, 可以以每秒 30 帧的速度捕获 20 个光圈系数的图像, 这也是目前此领域最新进展之一。

高动态范围成像指捕捉、存储、传输和显示真实世界光亮广泛范围并进行精确表示。静态 HDR 图像处理技术已经发展了二十多年, 而随着 HDR 摄像系统的诞生, HDR 最终将会成为主流成像技术。本书旨在全面介绍 HDR 技术, 并给出实践指导, 以促进 HDR 技术的广泛使用和传播。本书不仅介绍 HDR 成像的技术难题和解决方法, 还提供了大量 MATLAB 代码。希望读者能够将 HDR 技术作为真实世界成像时的第一选择。

本书涵盖了 HDR 成像从获取到显示的所有方面, 包括如何评价 HDR 处理结果, 以及如何衡量 HDR 处理结果与真实场景之间的差异。本书分为 7 章。第 1 章介绍了 HDR 的基本概念, 包括人眼如何观察真实世界中的场景以及如何在计算机上表示。第 2 章介绍 HDR 处理流程、捕捉真实世界光照的必要性以及如何显示。第 3 章和第 4 章研究了 HDR、LDR (Low Dynamic Range, 低动态范围) 数据和显示之间的关系。在过去的二十多年间, 研究人员提出了许多色调映射技术, 希望将 HDR 数据栩栩如生地显示在 LDR 显示器上。第 3 章主要介绍了几类代表性的色调映射算子。第 4 章主要介绍展开算子, 通常也称为逆色调映射算子 (iTMO)。此类算子考虑将 LDR 数据进行展开并显示在 HDR 设备上, 这个问题与第 3 章考虑的问题完全相反。第 5 章考虑了基于图像的光照 (IBL) 技术, 这也是 HDR 技术的一个重要应用领域。计算机图形学技术使用 HDR 的光照对虚拟场景进行着色。例如, 使用在中国捕获的光照数据对汽车的 CAD 模型进行着色, 汽车设计师就可以考虑使用什么样的喷漆方法, 让汽车看起来目前就在中国。另外一个例子是使用基于图像的光照为演员着光, 可以让演员看起来现在身在某处, 但实际上这个地

方他们从未去过。研究人员提出了许多色调映射和展开方法。部分方法考虑在使用 LDR 显示设备或数据的情况下, 如何尽量生成和真实世界一致的精确表示。第 6 章讨论如何评估这些方法的效果, 即评估在 LDR 显示器上显示 HDR 内容的效果, 也评估在 HDR 设备上显示 LDR 数据的效果。捕捉真实场景的光照产生了巨大的数据量。在 SIGGRAPH 会议上演示的 HDR 视频, 每帧数据量达到 24MB 之多, 一分钟数据量约为 42GB, 而 1 分钟 LDR 的数据量仅为 9GB。因此, 本书最后一章讨论 HDR 图像和视频的压缩问题, 以利于后续的存储、传输和编辑处理, 也使 HDR 技术能够更加贴近实际。

MATLAB 简介

MATLAB 是一款强大的数值计算软件。该软件诞生于 20 世纪 70 年代末, 后来 MathWorks 公司将它做成了商业化产品。MATLAB 目前在学术界和工业界应用广泛。MATLAB 还能以交互式方法显示许多算法, 因此, 本书选择 MATLAB 演示本书中介绍的 HDR 主要算法, 并将它们合并后放在 HDR 工具箱中。在附录 C 中, 介绍了 HDR 工具箱。在本书每章开头, 首先给出的所有算法都会用到 MATLAB 代码。然后在后续的算法介绍中, 依次给出每个算法自有的核心代码。代码中, 首先需要设定执行算法所需的输入参数。

下面介绍一个代码实例。图例 1 给出了 Schlick 色调映射算子的代码片段。变量 `schlick` 是该算法包含的输入参数之一, 用于指定 `schlick` 算法的模型类型。可以选择如下 3 种情形之一进行处理: `standard`、`calib` 和 `nonuniform` 模式。`standard` 模式将用户输入参数 p 作为参数, `calib` 模式和 `nonuniform` 模式分别使用均匀和非均匀量化技术。变量 `schlick_p` 可以使用参数 p 或者参数 p' , 如何选择取决于所用模式。变量 `schlick_bit` 表示输出显示的位数 N , `schlick_dL0` 表示参数 L_0 。算法第一步从图像中提取亮度通道并计算亮度最大值 L_{Max} 和最小值 L_{Min} , 以备后续计算 p 时使用。然后, 按照所选择的模式, 使用 3 种模式之一进行计算: 参数 p 或由用户指定并按照 `standard` 模式进行处理, 或按照方程 (3.9) 进行计算, 或按照方程 (3.10) 进行计算。最后, 利用方程 (3.8) 压缩亮度通道的动态范围。

图例 1 MATLAB Code: Schlick 的色调映射算子[189]

```
if(~exist('schlick_mode')|~exist('schlick_p')|~exist('schlick_bit')|~  
    exist('schlick_dL0')|~exist('schlick_k'))  
    schlick_mode='standard';  
    schlick_p =1/0.005;  
end
```

```
%Max Luminance value
LMax=max(max(L));

%Min Luminance value
LMin=min(min(L));
if(LMin<=0.0)
    ind=find(LMin>0.0);
    LMin=min(min(L(ind)));
end

%Mode selection
switch schlick_mode
    case 'standard'
        p=schlick_p;
        if(p<1)
            p=1;
        end

    case 'calib'
        p=schlick_dL0*LMax/(2^schlick_bit*LMin);

    case 'nonuniform'
        p=schlick_dL0*LMax/(2^schlick_bit*LMin);
        p=p*(1-schlick_k+schlick_k*L/sqrt(LMax*LMin));
end

%Dynamic Range Reduction
Ld=p.*L./((p-1).*L+LMax);
```

致谢

很多人在我攻读博士和撰写本书的过程中给予很多帮助。首先特别感谢我在 Warwick 和 Bristol 的同事、教员和教授们: Patrick、Kurt、Alessandro、Alan、Karol、Kadi、Luis Paulo、Sumanta、Piotr、Roger、Matt、Anna、Cathy、Yusef、Usama、Dave、Gav、Veronica、Timo、Alexa、Marina、Diego、Tom、Jassim、Carlo、Elena、Alena、Belma、Selma、Jasminka、Vedad、Remi、Elmedin、Vibhor、Silvester、Gabriela、Nick、Mike、Giannis、Keith、Sandro、Georgina、Leigh、John、Paul、Mark、Joe、Gavin、Maximino、Alexandrino、Tim、Polly、Steve、Simon 和 Michael。也要感谢 VCG 实验室 ISTI-CNR 给我时间进行写作, 还要感

谢实验室同事的支持。

相比于家庭对我的支持，我对他们亏欠很多，因此要深深感谢我的父母 Maria Luisa 和 Renzo、哥哥 Piero 和嫂子 Irina、哥哥 Paolo 和嫂子 Elisa。最后，感谢在本书撰写过程中 Silvia 所给予的耐心、幽默和爱。

Francesco Banterle

当我多年前从颜色科学转向计算机图形学时，就已经开始准备撰写此书。正是因为此事，我才有机会移居到维也纳，并且选择 HDR 领域作为我的研究方向。非常感谢 Werner Purgathofer，他给了我机会开展研究，并且当我在维也纳技术大学攻读博士学位之初，也给我机会认识了 Meister Eduard Groeller。我非常感谢本书的其他作者：在一次出差从机场回来的出租车上，Alan Chalmers 和我一起分享了他的经历，而且我们共同得到了 goHDR 公司的项目资助，并且开始逐渐看到令人惊喜的研究成果。Kurt Debattista 和 Francesco Banterle 是科学领域非常优秀的人才。我从他们身上学到了许多。在 Warwick 数字实验室，我与年轻的研究者共同度过了研究生涯中的许多重要时刻。在此要感谢 Vedad、Carlo、Jass、Tom、Piotr、Alena、Silvester、Vibhor 和 Elmedin，还要感谢许多同事，如 Sumanta N.Pattanaik、Mateu Sbert、Karol Myszkowski、Attila、Laszlo Neumann 和 Yiorgos Chrusanthou。还要感谢我的家人，我的妈妈 Franca 和我的外祖母 Nella 永驻我心中。非常感谢我的父亲 Sincero，哥哥 Marco 和我的未婚妻 Despo，他们始终如一支持我的工作。我将此书的每一行以及撰写此书的每一秒都献给他们。

Alessandro Artusi

首先，非常感谢本书的其他 3 位作者，正是由于他们的努力工作，本书才可以付诸印刷。还要感谢我的博士生，他们一直给予很多帮助，并在技术方面提出了很好的建议，这些博士生包括 Vibhor Aggarwal、Tom Bashford-Rogers、Keith Bugeja、Piotr Dubla、Sandro Spina 和 Elmedin Selmanovic。还要感谢我过去多年间在 Bristol 和 Warwick 的同事，他们是我灵感的源泉，和他们在一起工作非常愉快，这些同事包括 Matt Aranha、Kadi Bouatouch、Kirsten Cater、Joe Cordina、Gabriela Czanner、Silvester Czanner、Sara de Freitas、Gavin Ellis、Jassim Happa、Carlo Harvey、Vedad Hulusic、Richard Gillibrand、Patrick Ledda、Pete Longhurst、Fotis Liarokapis、Cheng-Hung (Roger) Lo、Georgia Mastoropoulou、Antonis Petroustos、Alberto Proenca、Belma Ramic-Brkic、Selma Rizvic、Luis Paulo Santos、Simon Scarle、Veronica Sundstedt、Kevin Vella、Greg Ward 和 Xiaohui (Cathy) Yang。我永远感谢父母对我长久以来的支持，永远感谢他们。我的祖父母也是我灵感的源泉，我非常思

念他们，也永远不会忘记他们。最后，真心感谢我的妻子 Anna 的爱和支持，也要感谢 Alex 使我们的生活变得更加完整。

Kurt Debattista

本书是多年研究成果的结晶，多位优秀的博士后和博士生都贡献良多，其中 3 位是本书的共同作者。我感谢他们多年的努力工作，本项研究建立在此领域很多先驱者的研究基础之上，这些先驱者包括 Holly Rushmeier、Paul Debevec、Jack Tumblin、Helge Seetzen、Gerhard Bonnet 和 Greg Ward。随着世界各地越来越多的研究人员不断开展此项研究，HDR 技术已经走出当初狭窄的应用领域，逐渐惠及大众。正如当年从黑白显示转换到彩色显示一样，HDR 如今已经站在媒体技术进步的前沿。在不远的将来，捕捉和显示真实世界的光照将成为常态，HDR 电视将进入千家万户。许多激动人心的新研究和商业机会将会不断呈现。与 goHDR 类似的新公司将不断出现，世界将会共同接受 HDR 技术。除了感谢陪伴我多年的研究小组，我还要感谢 Lord Battacharrya 教授，WMG，远见卓识的 Warwick 大学建立了 Visualisation 并将它作为数字实验室的关键研究领域之一。借助于 West Midlands 的便利条件，我们有机会继续发展并设计了 Spheron VR，它也是世界上第一台真正的真实 HDR 视频相机。Christopher Moir, Ederyn Williams, Mike Atkins, Richard Jephcott, Keith Bowen FRS 和 Huw Bowen 使我们感受到了 goHDR 公司的研发氛围，而且他们的热情和经历促使我们取得成功。我还要感谢 Eurographics 渲染论坛和 SCCG 委员会，它们是此领域研究中非常有价值的会议。特别要感谢 Andrej Ferko、Karol Myszkowski、Kadi Bouatouch、Max Bessa、Luis Paulo dos Santos、Michi Wimmer、Anders Ynnerman、Jonas Unger 和 Alex Wilkie。最后，感谢 Eva、Erika、Andrea 和 Thomas 对我的爱和支持。

Alan Chalmers

目 录

第 1 章	引言	1
1.1	光	4
1.2	人眼视觉	6
1.3	颜色空间	7
第 2 章	HDR 处理流程	11
2.1	HDR 内容生成	12
2.1.1	合并多曝光图像生成 HDR 内容	12
2.1.2	直接采集 HDR 数据	16
2.1.3	HDR 内容生成	18
2.1.4	单曝光图像的 HDR 展开	20
2.2	HDR 内容存储	20
2.3	HDR 内容可视化	25
2.3.1	色调映射	25
2.3.2	HDR 内容直接可视化	25
第 3 章	色调映射	31
3.1	色调映射的 MATLAB 程序框架	34
3.2	全局色调映射算子	36
3.2.1	简单映射算法	36
3.2.2	亮度再现	39
3.2.3	量化技术	41
3.2.4	视觉自适应模型	44
3.2.5	直方图校正	48
3.2.6	依赖于时间的视觉自适应	52
3.2.7	自适应对数映射	54
3.2.8	人类视锥细胞模型的高动态范围视频编码	57
3.3	局部色调映射算子	59
3.3.1	空间非均匀缩放	59

3.3.2	真实感图像显示的空间视觉自适应多尺度模型	62
3.3.3	摄影色调再现技术	63
3.3.4	高对比度图像的色调映射算法	67
3.3.5	基于 Retinex 的色调映射算子	71
3.4	色调映射的频率算子	72
3.4.1	低曲率图像简化算子	73
3.4.2	快速双边滤波算子	74
3.4.3	梯度域压缩算子	77
3.4.4	用子带结构压缩与展开高动态范围图像	81
3.5	色调映射的分割算子	83
3.5.1	基于分割和自适应吸收法	83
3.5.2	色调再现中的亮度感知	85
3.5.3	色调的交互式局部操控	91
3.5.4	曝光融合	95
3.6	色调映射问题发展新趋势	100
3.6.1	色貌	101
3.6.2	颜色校正	103
3.6.3	通用色调映射算子的模拟	104
3.6.4	自适应色调映射显示	107
3.7	总结	108
第 4 章	低动态范围数据的展开算子	109
4.1	基于单幅图像的信号线性化	110
4.1.1	盲逆伽玛函数	111
4.1.2	基于单幅图像的辐射校准	112
4.2	高对比度显示的去轮廓模型	114
4.2.1	振幅抖动	115
4.2.2	轮廓去除	115
4.3	展开算子的 MATLAB 框架	116
4.4	全局模型	117
4.4.1	动态范围展开的幂函数模型	117
4.4.2	HDR 显示器的线性缩放	119
4.4.3	过曝光 LDR 图像的伽玛展开	120

4.5	分类模型	123
4.5.1	HDR 显示器的高亮度重现	123
4.5.2	HDR 显示中的亮视频特征增强	126
4.6	展开映射模型	128
4.6.1	非线性展开映射	128
4.6.2	LDR2HDR: 旧式视频和照片随机逆色调映射	130
4.7	基于用户交互的模型: HDR 幻觉	133
4.8	总结	134
第 5 章	基于图像的光照	137
5.1	环境映射	137
5.1.1	经纬映射	140
5.1.2	角度映射	141
5.1.3	立方体映射	142
5.2	利用 IBL 进行渲染	142
5.2.1	光源生成	146
5.2.2	Monte-Carlo 积分和重要采样	150
5.2.3	交互式 IBL 的 PRT 方法	154
5.2.4	多维渲染	155
5.3	总结	159
第 6 章	评价体系	161
6.1	心理物理学实验	161
6.1.1	基于相似度以及个人偏好的色调映射算子感知评估	163
6.1.2	HDR 渲染算法评估	163
6.1.3	基于 HDR 显示器的色调映射算子成对比较	164
6.1.4	基于人类感知现实的色调映射算子测试	164
6.1.5	色调映射算子的实景检验	165
6.1.6	基于 Cornsweet-Craik-O'Brien 视觉幻觉的色调映射方法感知评估	166
6.1.7	用于非图形(科学)高动态范围图像渲染的色调映射方法评估	167
6.1.8	范围可变显示器上的真实世界再现方法分析	168
6.1.9	基于图像属性和质量的色调映射方法评估	170
6.1.10	面向逆色调映射技术的评估方法	170

6.2 误差度量	171
6.2.1 在 HDR 图像中预测视觉差异	172
6.2.2 与动态范围无关的图像质量评估体系	173
6.3 总结	175
第 7 章 HDR 内容压缩	177
7.1 HDR 图像内容压缩的 MATLAB 框架	177
7.2 HDR 图像压缩	177
7.2.1 向后兼容的 JPEG-HDR 压缩格式	178
7.2.2 HDR-JPEG2000 压缩格式	181
7.2.3 高动态范围图像两层编码算法	184
7.3 HDR 纹理压缩	187
7.3.1 使用几何形状的 HDR 纹理压缩	187
7.3.2 基于比特和整数算子的 HDR 纹理压缩	189
7.3.3 LDR 和局部 HDR 纹理压缩编码	191
7.3.4 色调映射及其逆解析的高动态纹理压缩	193
7.3.5 基于 DXTC 的 HDR 纹理压缩方案	196
7.4 高动态视频压缩	197
7.4.1 感知驱动的高动态范围视频编码	198
7.4.2 向后兼容 HDR-MPEG	199
7.4.3 优化失真率的高动态视频压缩	201
7.5 总结	203
附录 A 双边滤波	205
附录 B Retinex 滤波	209
附录 C MATLAB HDR 工具箱	211
参考文献	215