



经典译丛

WILEY

信息与通信技术

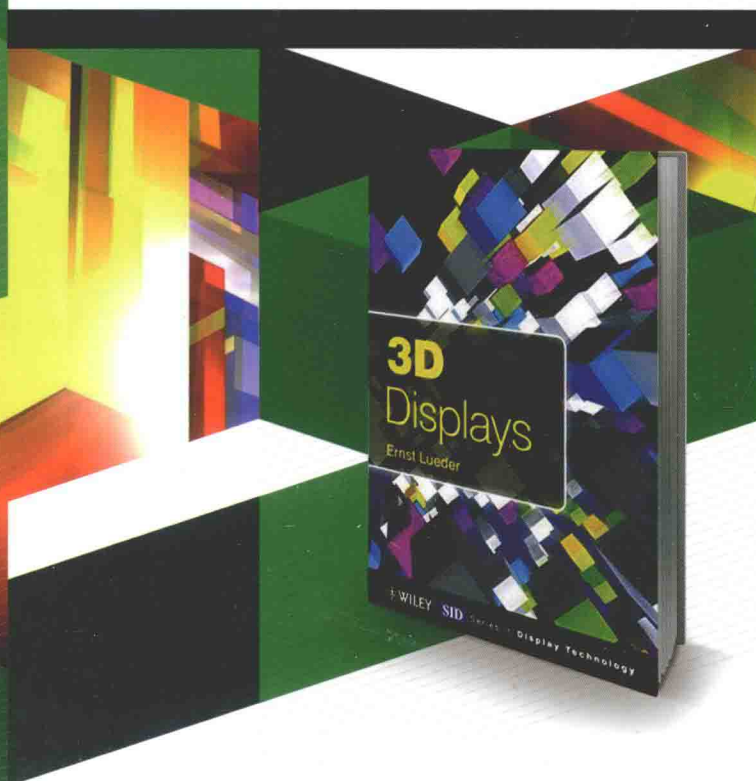
3D Displays

3D显示技术

3D Displays

【美】 Ernst Lueder 著

余宏生 王彤彤 梅军进 等译



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

经典译丛·信息与通信技术

3D 显示技术

3D Displays

[美] Ernst Lueder 著

余宏生 王彤彤 梅军进
杨 萌 王 凤 华 东 译

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为电子工程师、物理学者、平板显示设计工作者、学生以及其他学科的相关科学家全面学习 3D 显示技术提供帮助,详细全面地介绍最新的 3D 显示技术。涵盖 5 种实现 3D 知觉的方法,即立体显示技术、自由立体显示技术、集成成像技术、全息显示技术及体显示技术。本书旨在促进对 3D 系统的光电效应及寻址电路的完整理解。本书重点介绍立体显示技术和自由立体显示技术,因为这些技术最接近商业化,并且,立体显示器的基本组成部分是阵列式偏光膜和更小角度的线栅偏振器。本书侧重于全面介绍 3D 显示领域的发展全面和最新进展,为技术的未来发展和产业化服务,适合当前技术和产业发展的需要。

3D Displays, 9781119991519, Ernst Lueder.

Copyright © 2012, John Wiley & Sons, Ltd.

All rights reserved. This translation published under license.

AUTHORIZED TRANSLATION OF THE EDITION PUBLISHED BY JOHN WILEY & SONS, Ltd.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Ltd.

本书简体中文字版专有翻译出版权由英国 John Wiley & Sons, Ltd. 授予电子工业出版社。

未经许可,不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2015-8701

图书在版编目(CIP)数据

3D 显示技术 / (美)恩斯特·吕德尔(Ernst Lueder)著. 余宏生等译. —北京: 电子工业出版社, 2016.9

书名原文: 3D Displays

ISBN 978-7-121-29145-6

I. ①3… II. ①恩… ②余… III. ①三座标显示器—高等学校—教材 IV. ①TN873

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 140333 号

策划编辑: 窦 昊

责任编辑: 窦 昊

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 17 字数: 424 千字

版 次: 2016 年 9 月第 1 版

印 次: 2016 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 58.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010)88254466, douhao@phei.com.cn。

译者序

3D 显示利用两眼视差产生 3D 立体逼真图像,与 2D 显示相比,3D 显示更具深度感、层次感及真实感,使观众通过视觉感知产生心理愉悦。3D 显示技术在机器视觉、虚拟现实与增强现实、3D TV、3D 电影、3D 游戏,甚至军事、医疗、教育及航空航天等领域具有广阔的应用前景,正受到越来越多的科技工作者的关注,吸引了大批科研人员开展 3D 显示技术方面的研究。但是,我国在 3D 显示技术方面的研究相对滞后,很多专业名词术语从国外著作中翻译而来,3D 显示技术方面的中文著作非常少,网络上关于 3D 显示的技术词汇五花八门,给研究者的学习和交流造成不便和困扰。

2015 年,译者受国家留学基金委资助赴澳大利亚 RMIT 访问学习期间,向电子工业出版社提出希望翻译“3D Displays”这本书,想法得到出版社的大力支持。于是,我们迅速组织光学、材料科学、计算机科学及数学等专业的教授、博士组成翻译团队,在大家的通力合作下,在 RMIT Henry Wu 教授的大力支持下,本书的翻译得以在短期内完成。

全书共分 8 章。余宏生教授负责翻译前言、第 2 章、全书图表及封底;王彤彤副教授负责翻译第 4 章、第 5 章;梅军进副教授负责翻译第 1 章、第 3 章;王凤博士负责翻译第 6 章;杨萌副教授负责翻译第 7 章、第 8 章;华东副教授负责翻译术语表及图表的审订;全书由余宏生教授统稿。

本书可作为通信工程、计算机科学与技术、信息与计算科学、应用物理等相关专业的本科或者研究生教材、参考书,也可作为 3D 显示技术的研究者或者科技爱好者的参考书。

本书的翻译在忠实于原文的前提下,专业词汇尽量采用国内大多数研究者的习惯性表述,由于译者水平所限,书中难免存在不妥之处甚至错误,真诚希望读者不吝赐教,批评指正;也欢迎读者相互交流,译者通信邮箱: yhs99981@sina.com。需要本书相关的教案和课件等学习资料的读者可在网站 www.hxedu.com.cn 下载。

本书的翻译出版受以下项目资助:

- 国家留学基金委 2014 年地方合作项目(录取文号:留金法[2014]5050 号)
- 湖北省优秀青年科技创新团队资助计划项目(No: 13xtz05)
- 湖北省教育厅青年项目(No: Q20123004)
- 湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(No: B2016273)
- 湖北理工学院青年项目(No: 15xjz04Q)

序

2000 年, Lueder 教授为 Wiley-SID 显示技术系列丛书撰写了他的第一本书《液晶显示技术》。那本书在整套丛书中销售最好, 现在已经是第 2 版了。因此, 这次就 3D 显示技术的主题给 Ernst Lueder 的新作写序, 我感到很高兴。

大多数视力正常的人就具有 3D 知觉。我们对在我们周围所看到的一切很熟悉, 我们知道一些目标比其他目标更近; 我们知道远处的物体在穿越我们的视野时, 似乎比那些离我们较近的物体移动得更慢, 等等。虽然熟悉 3D 电影和电视的人很少, 但是正在逐渐增加。然而, 我们的大脑如何通过视觉刺激生成我们所熟悉的世界的三维视图, 绝大多数人对此只有一个模糊的了解。当谈到在显示器上产生 3D 图像时, 要求更加复杂, 不仅要避免由于显示不一致或视觉线索误导造成的眼睛疲劳, 而且要以足够的速度处理巨量的数据, 以实现实时 3D 可视化。

本书开始以坚实的数学知识为基础提出主题。在对 3D 的生理感知进行概述后, 详细描述立体显示器以及最先进的 3D 显示器——自由立体显示器。考虑到已有大量 2D 的相关内容, 本书更多地关注从 2D 内容合成到 3D 这个最重要的主题。接着, 本书阐述质量问题, 尤其注重提高 3D 图像的视觉质量和减少传输所需带宽的方法, 特别强调被称为基于深度图像的绘制方法。最后, 本书描述三种类型的显示器(集成成像显示器、全息显示器和体显示器), 虽然它们的发展没有立体显示技术和自由立体显示技术那么完善, 但是, 当视图随着观众的位置改变而变化时, 能够呈现真三维图像, 使得越近的目标越清晰, 越远的目标越模糊。这与仅提供三维错觉相反, 许多立体图像存在这种情况。

这本书最后一章名为“3D 技术评估简介”, 与其说这是猜测接下来是什么, 不如说是已经描述的技术和方法在未来的逻辑延伸。全书内容完整, 都是必要的方程、插图和参考引用。虽然这个主题很复杂, 但是得到了清楚的阐述, 这将为读者提供良好的技术基础, 以此进一步将他们引领到激动人心的三维显示的科学领域。

Anthony Lowe

2011 年于英国 Braishfield

前 言

现在平板显示技术和生产已经很成熟，市场需要引入 3D 显示技术。本书内容涵盖 5 种实现 3D 知觉的方法，即立体显示技术、自由立体显示技术、集成显示技术、全息技术和体显示技术。

感谢 Tony Lowe 博士对这本关于 3D 技术著作的支持，他对学术的发展趋势的了解非常透彻。Dan Schott 有关平板显示技术的出色学识使我受益颇多，对此非常感激。Christof Zeile 博士对新的显示技术富有前瞻性的评价，据此使我注意到各种新的出版物。非常感谢他的支持。

对排版人员出色完成工作表达谢意。Neil Manley 主要完成索引，对此表示由衷感谢。非常感谢 Heidi Schuehle 辛勤而细致地打印手稿，Rene Troeger 非常专业地完成图表的绘制。

Ernst Lueder

2011 年 10 月于美国 Scottsdale

引 言

目前,显示器的设计和生产已足够成熟,人们可以向市场推出三维(3D)显示设备。移动设备以近眼显示方式率先采用3D显示器,接着是家用电视机。

本书涵盖5种实现3D知觉的方法,即立体显示技术、自由立体显示技术、集成成像技术、全息显示技术及体显示技术。本书旨在促进对3D系统的光电效应及寻址电路的完整理解。在书中的方程式通常不是简单地陈述,而是推导得到的;或者如果不完全这么做,至少给出推导的提示。用向量解释全息技术的基础就是这个概念的一个例子,本书将对其进行概述,但是也可以从电子工程或琼斯向量获取相关知识,这使得与全息图像相关的复杂事实更容易理解。

由于立体显示技术和自由立体显示技术最接近商业化,本书将对其重点介绍。立体显示器的基本组成部分是图形化相位差膜和更小角度的线栅偏振器。自由立体显示器依赖于分束器、柱状透镜、视差障栅、光导和不同类型的3D薄膜。这些内容将在本书中做详细介绍。

立体显示器要求的眼镜根据左右眼视场可以分为快门式和圆偏振式,线偏振眼镜存在对头部摆动比较敏感的缺点。本书还特别关注3D系统工作于空间复用、时间复用或二者联合复用时新颖快速的寻址方案。为了抑制串扰和模糊,首选240 Hz的帧频,采用并行处理方法及最近发表的交叉存取寻址方法可提高寻址速度,这个速度可以处理图像。本书还详细概述了自由立体显示方法是如何提供物体的透视图和侧视图。

本书为理解集成图像(Integral Image, II)开辟了一条途径,其信息收集阶段类似于自由显示技术的柱状透镜。采用这项技术将真实图像和虚拟图像放在一起,非常自然地得到具有独创性的集成图像投影仪的设计,该设计使观察者可以在虚拟的显示物体周围漫步,从而享受真3D显示的成果。

全息显示器这一章引导读者了解数字计算机生成全息图的方法,目前全息图还不能进行实时处理。体显示器由一堆LCD组成,每一片LCD对应于特定的深度,此处图像融合的限制值得注意。第4章尤其着力于使平板显示器的设计者熟悉由计算机科学家在3D图像质量评价和进展方面的工作;基于客观和主观判据及所选择特征的运动跟踪,介绍了评价3D显示特性的算法;特别关注建立视差图以及采用节省带宽的“基于深度图像的绘制”(DIBR)准备即将传送的3D图像,由一组单一的观察者接收3D图像的头部跟踪方法不包括在内。

目 录

第 1 章 3D 感知心理学	1
1.1 双目视觉或人类立体视觉	1
1.2 位置和视差的失配及焦深、景深	3
1.3 视差的距离定标	7
1.4 两眼间的串扰	7
1.5 深度感知的心理学效应	11
1.6 高级感知因子	11
致谢	12
参考文献	12
第 2 章 立体 3D 显示器	14
2.1 立体显示器与区域复用	14
2.1.1 产生偏振的相位差片	14
2.1.2 处理第二幅视图的线栅偏振器	21
2.1.3 具有两个 LCD 显示器的立体显示	24
2.2 联合区域分割复用和时间分割复用的 3D 显示器	27
2.3 时序立体显示器	33
2.3.1 采用有源相位差膜的时序显示	33
2.3.2 采用 OCB LCD 的快速时序 3D 显示器	35
2.3.3 采用黑色插入的时序 3D 显示器	36
2.4 立体显示的特殊方法	42
2.5 立体投影仪	50
2.6 AMOLED 和 AMLCD 的隔行寻址、同时寻址及逐行寻址	62
2.7 相位差膜和分束器的光导校准	70
致谢	70
参考文献	72
第 3 章 自由立体显示器	74
3.1 采用柱状透镜的空间复用多视图自由立体显示器	74

3.2	空间复用多视图立体显示技术与可切换柱状透镜	87
3.3	采用固定和可切换视差障栅的自由立体显示器	96
3.4	时序自由立体显示器和定向背光	105
3.4.1	采用特殊反射镜或 3D 薄膜的时序显示器	106
3.4.2	采用定向切换背光的时序显示器	110
3.5	深度融合的 3D 显示器	117
3.6	采用光导的单视图和多视图 3D 显示器	127
3.7	3D 显示和医学应用的测试	130
	致谢	130
	参考文献	132
第 4 章	3D 显示的质量评价	134
4.1	引言与综述	134
4.2	从给定图像中提取质量数据	136
4.3	基于客观测量提供视差图或深度图的算法	137
4.3.1	基于绝对误差和的算法	137
4.3.2	图像平滑和边缘检测	141
4.4	基于主观测量的算法	146
4.5	KLT 特征跟踪算法	154
4.6	2D 到 3D 转换的特殊方法	158
4.6.1	基于运动视差 2D 到 3D 图像的转换	158
4.6.2	基于静止图片的深度线索从 2D 到 3D 转换	160
4.6.3	基于灰度和亮度设置从 2D 到 3D 转换	161
4.7	根据单视图 2D 或 3D 原始图像从视差图重建 3D 图像	164
4.7.1	深度图预处理	164
4.7.2	创建左眼和右眼视图的图像变形	166
4.7.3	遮挡去除和空洞填充	172
4.7.4	基于深度图像的绘制 (DIBR) 的特殊系统	174
	致谢	181
	参考文献	183
第 5 章	集成成像技术	185
5.1	集成成像技术基础	185
5.2	深度、可视角度和 3D 集成图像分辨率的增强	188

5.2.1 深度的增强·····	189
5.2.2 视场角的增大·····	193
5.2.3 分辨率的提高·····	195
5.3 集成摄像术·····	197
5.4 可转换 2D/3D 集成成像技术·····	206
致谢·····	211
参考文献·····	212
第 6 章 3D 全息显示器·····	214
6.1 引言与综述·····	214
6.2 记录全息图和原始 3D 图像的重现·····	214
6.3 全息屏幕·····	223
6.4 基于傅里叶变换的数字全息技术·····	225
6.5 全息激光投影仪·····	229
致谢·····	231
参考文献·····	232
第 7 章 体 3D 显示器·····	233
7.1 体显示的性质·····	233
7.2 访问和激活在静态体显示器中的体素·····	234
7.3 扫描式体 3D 显示器或机械式 3D 显示器·····	241
致谢·····	247
参考文献·····	247
第 8 章 3D 技术评估简介·····	248
术语表·····	251

第1章 3D 感知心理学

1.1 双目视觉或人类立体视觉

由于一只眼睛只能感知一幅平面图像,因此,3D 视觉通常是通过两只眼睛的合作完成的,每只眼睛分别感知物体的一个视图。根据眼睛的不同位置,眼睛从同一物体接收到的图像是不同的。双目视觉提供第3维——深度感,图1.1所示的双眼单视界圆对此做进一步的说明。这个圆可作为确定深度的参考^[1,2]。如果眼睛聚焦(也经常使用其同义词凝视、调节或会聚)在双眼单视界圆的点 M ,眼睛的睫状肌将眼球转动到一个位置,使得点 M 的光线通过瞳孔平行于眼内晶体的轴,轴相交于点 M 。然后,光线射到图1.1中视网膜的中央凹,左眼为点 m_l ,右眼为点 m_r 。中央凹是视网膜的中心,并具有最大的光受体密度。眼球的转动称为辐辏。显然,眼睛的轴线不再是平行的,这将给大脑提供所需的深度信息^[1,3]。在这种情况下,来自点 P 的光线与视网膜相交于左眼的点 p_l 和右眼的 p_r 。根据几何知识可知,圆上所有的点 P 在圆周上的角度 α 对于上述瞳孔之间的距离(瞳距) b 都是相同的^[4]。在视网膜上角度 γ ,通常以弧分(arcmin)为单位,称为视差。由于在双眼单视界圆上所有的点 M 和点 P 在两眼中具有相同的视差 γ ,圆上所有点的视差差异 d 为零。点 P 离点 M 越远,但仍然在双眼单视界圆上,视差就越大^[2,3]。很明显,较大的视差与较小的深度相关联。视差信息被转移到大脑,将其转换为感知深度。大脑是如何将两个视差融合成3D图像的,目前还没有完全搞清楚。

由于在双眼单视界圆上的所有点的视差差异为零,该圆可作为深度的基准。本书所述的视差融合和深度知觉仅在图1.1中的潘诺融合区有效^[3]。在这个区域中,可靠的深度知觉随着视差大小的增加而单调递减。这种关系被称为定量立体视觉。图1.1^[3]中的点 Q 不在双眼单视界圆上,它更靠近眼睛且仍然在潘诺(Pannum)融合区中,视网膜上的视差 γ_l 和 γ_r 是由左眼的点 q_l 和右眼的点 q_r 给出的。这些点位于越过中央凹的另一侧视网膜上,具有所谓的交叉视差,而比双眼单视界圆更远的点则具有非交叉视差,这些点的像点对应于具有交叉视差的 q_r 和 q_l ,位于中央凹的相对侧。

点 Q 的视差 γ_l 和 γ_r 不再相等。值 $\gamma_l - \gamma_r \neq 0$ 与视差一起给大脑提供点 Q 与双眼单视界圆的深度差异的信息。然而,也不完全清楚大脑是如何处理视差的差异的。

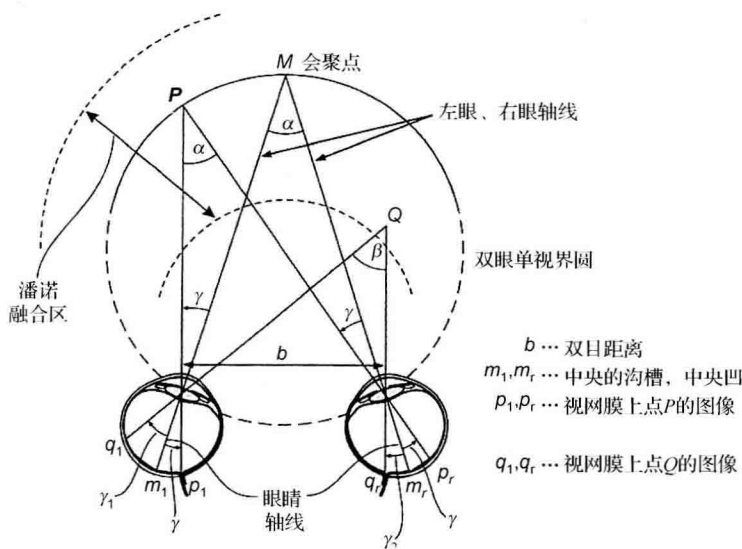


图 1.1 双眼单视界圆

当物体从双眼单视界圆向眼睛靠近时, 在距离眼睛大约 2 m 或者更近处, 最终失去定量立体视觉。图像融合不再有效, 出现了两幅图像, 称为“复视”^[3]。由于视差过大, 眼睛试图适应物体, 并分别感知物体及其背景。大脑无法成功地抑制背景信息。另一方面, 物体距离双眼单视界圆越远, 视差越小; 因为眼球晶体的轴更接近于平行。最后, 在超出 10 m 左右的距离处, 无法分辨微小视差之间的差异, 深度信息丢失。这与我们无法估计太远处物体的深度差异的现象是一致的。

图 1.1 中的瞳距 b , 对于美国的成年人, 其平均距离为 6.5 cm, 而 90% 的成年人在 6~7 cm 之间^[5]。对于空间频率 2~20 周/度 (cycles/degree) 的感知, 视差的总范围大约为 80 弧分 (arcmin); 对于约 0.1 周/度的低空间频率的感知, 大约为 8 弧度 (arcdegree)。这意味着低的空间频率比更高的空间频率提供的视差较大。因此, 低的空间频率与较高的空间频率相比, 视差的敏感度更高。同样的事实也适用于图像中亮度的时间频率, 频率越低, 视差敏感度越高。

最小仍然可辨认的视差, 即立体视锐度 $D_{\min}$, 在 2~20 周/度的空间频率范围内为 20 弧秒 (arcsec), 而最大可感知视差 $D_{\max}$ 对于低空间频率为 40 弧分^[3]。由于 $D_{\min}$ 和 $D_{\max}$ 的值都适用于代表交叉视差和非交叉视差的不同深度范围, 这个值可以添加到总数中, 总数对于空间高频为 80 弧分, 对于空间低频为 8 弧度, 上面已经给出^[6,7]。同样, 对于动态图像的时间频率, 这也是正确的。亮度的时间频率越低, 动态图像的视差灵敏度越大; 亮度的时间频率越高, 视差灵敏度越小。

视网膜到大脑的视觉路径有两个。以小细胞为主的背皮质通路将中央视网膜连接到

视觉皮层的腹侧皮层区,对空间图案和颜色进行分析。以大细胞为主的背皮质通路连接中央和外周视网膜到视觉皮层的背侧皮层区,对方向控制和生物运动的光流信息进行分析。关于视觉路径的更多信息可以在文献[8~10]中找到。

立体感异常与这些信息路径的缺陷相关,这些路径上的神经元仅对交叉视差或非交叉视差敏感。深度感被认为涉及两种类型神经元的反应。在立体感异常的个体中,一种类型的神经元对其信息不敏感,那么另一种类型的神经元就主导所有的视差信息的响应。在神经元只对属于比双眼单视界圆更远的物体的非交叉视差敏感的情况下,来自比双眼单视界圆更近的物体的交叉视差的信息被抑制,有利于感知远处的物体。人们会将近处特写信息感知为具有更远深度的远处的信息。当神经元只对交叉视差敏感时,人们将远处的信息感知为眼睛近处的深度^[11,12]。

罹患立体盲症的人,通常由一种称为“斜视”的疾病导致,被认为完全缺乏视差敏感神经元。

在退化的刺激条件下,如短暂的刺激曝光,发现立体视觉异常者占总人口的30%^[13]。另外,6%~8%的人口是立体盲症患者。相当大比例的人可能不能感知3D图像,将值得更多的关注。

另一种生理紊乱是双眼竞争。在这种情况下,一个人观看具有较大视差或者具有双眼未配准或失真的立体显示时,发生了两个眼睛的图像没有融合的情况^[7,14]。一只眼睛抑制了另一只眼睛的视觉活动。只可以看见一个视图,因为另一只眼睛的视图受到抑制,随着时间产生反转。也许人们在头戴显示器上对这个问题体验过,它来自不同来源的两个图像可能未配准或失真^[15]。

一只眼睛可以单独检测到两种深度的生理刺激,它们就是视差及运动视差。根据这种视差,人们可以理解运动物体对静止背景的移位。大脑和眼睛一起从该视差提取与深度相关联的3D感知。

与运动视差相似的是Pulfrich现象。一只眼睛被滤光片遮盖,使图像变暗,暗图像的处理相对于亮图像存在延迟。当观察者与物体存在相对移动时,导致视差误差。但是,它也可以用来提供一个深度线索,因为延迟使两只眼睛的图像不同地重现,如同通常由深度引起的情况一样。

1.2 位置和视差的失配及焦深、景深

现在来考虑一种可以用已知的立体事实来解释的现象。正如我们将在后面看到,在立体显示器和自由立体显示器中,物体所要求的两幅视图彼此相邻地呈现在显示屏幕上,所有显示的场景到观察者眼睛的距离是恒定的。这就引起了一个问题,眼睛采用与视差

相关的辐辏来适应这两幅图像，视差刺激大脑中的深度知觉。另一方面，屏幕上点的位置也传达深度信息，即为眼睛到屏幕不变的距离。这两个深度的细节是矛盾的，并且被称为位置与辐辏或视差的失配。这可能会导致观众不舒服，表现为眼睛疲劳、视力模糊或有轻微头痛^[7]。

幸运的是，从这个失配所产生的问题主要出现在约 0.5 m 的短距离观看中。一个浅显的解释是已经提及的事实，对于较大距离，视差变小，像点在视网膜上紧挨在一起，所以降低了与视差相关联的深度的分辨率。因此，基于深度的视差信息不再随着距离的增加有大的变化，根据位置更容易与深度信息匹配。实际上，已经发现，与电视屏幕 2 m 以上的观察距离不再引起令人烦恼的不适。

从景深和焦深导入一个更彻底的解释，对于移动的观众，3D 系统的设计也很重要^[17]。假设眼睛聚焦于在图 1.2 中的点 C 上的一个物体，提供清晰的图像。焦深描述的距离范围从比 C 更靠近眼睛的点 P 到比 C 更远的点 D ，在该范围内，一个物体仍然可以应用一个给定的检测判据被发觉。如果点 P 的距离为 p ，点 D 的距离是 d ，那么焦深 T （屈光度，diopter）为

$$T = \frac{1}{p} - \frac{1}{d} \quad (1.1)$$

其中， p 和 d 以 m 为单位。景深为

$$F = d - p \quad (1.2)$$

也以 m 为单位。

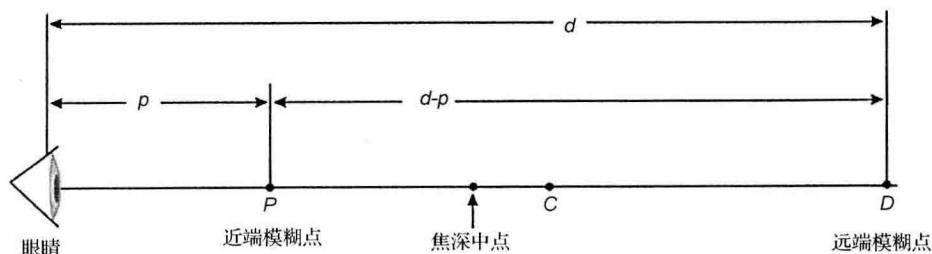


图 1.2 焦深和景深

单视界圆由 $1/f$ 定义，其中 f 是透镜的焦距，以 m 为单位；在此例中，透镜是焦距为 f 的眼睛，在 f 处眼睛可以看见清晰的图像。

在显示器上，特征的可探测性的判据可能是：

- (a) 视觉敏锐度或分辨能力的恶化程度；
- (b) 最小可感知图像模糊的鉴别力；
- (c) 能见度或通过对比丢失目标细节检测能力的下降；
- (d) 对引起位置变化的刺激的离焦模糊感知容忍度。

前三个准则依赖于离焦模糊的感知，最后一个取决于生理耐受性。点 P 称为近端模糊点， D 是远端模糊点。在点 P 以下和超过点 D 的图像不再能看得见。

现在报导的结果是基于准则 (a) 和在准则 (d) 中的离焦模糊^[17]。使用一个棋盘测试模板进行试验，测试者提供在检测正确的模板中正确答案的百分比。该测试模板大小为 1.25 弧分，是与一张 20/25 Snellen 视力符号相应的，瞳孔的直径为 4.6mm，测试结果显示于图 1.3 中。横坐标表示测试图案从注视点 C 的以屈光度 (dipoter) 为单位的位移。因此，横坐标以屈光度表示测试图案离焦的程度，纵轴表示对测试图案感知正确的视觉分辨率的百分比，这一比例呈高斯概率密度分布。

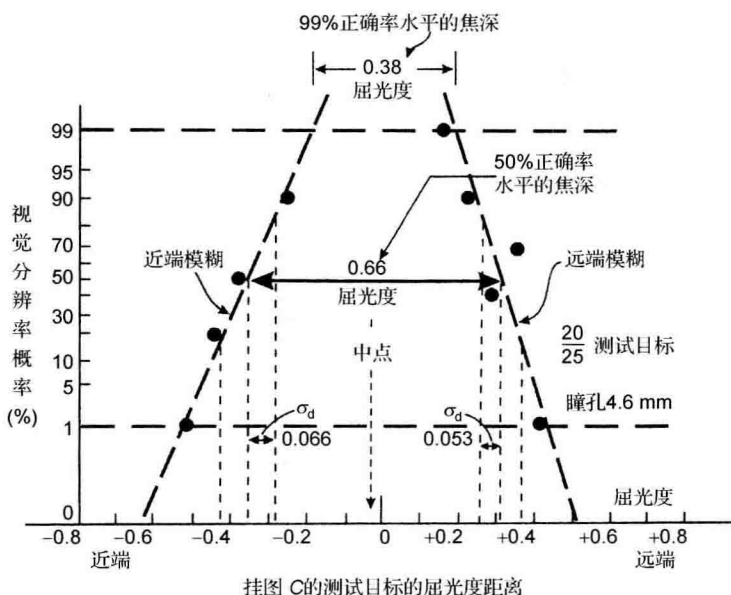


图 1.3 感知正确的分辨率百分比与图 1.2 中注视点 C 的测试图案的位移之间的关系

焦深的中点总比焦点 C 略微靠近眼睛，对于 50% 的正确视觉分辨率，焦深具有 0.66 屈光度的宽度；而对于 99% 的正确视觉分辨率，宽度缩小到 0.38 屈光度。近端模糊增加 10% 的视觉分辨率，焦深大约缩小 0.06 屈光度。在 99% 水平线处的焦深是离焦模糊的一个重要的值，在此处的视觉分辨率开始降低。

在图 1.3 中的图表取决于注视点 C 的位置。这可以从表 1.1 中明显看出，如表中注视点 C (m) 的测量距离、近端模糊距离 p (m) 及远端模糊距离 d (m)，以及最后的焦深 T (dipoter)。仅当 T 对所有 C 点恒定时，示图将独立于 C 的位置。在图 1.3 所示的视图点 C 距离眼睛约为 1 m 左右。景深， $d-p$ ，随着与注视点 C 的距离的增加而增加，单位为 m；它甚至可以为无限大。

表 1.1 近端模糊和远端模糊与位置 C 处焦深 T 的关系

注视点 C 的距离 (m)	近端模糊点的距离 p (m)	远端模糊点的距离 d (m)	焦深 T (屈光度)
1	0.75	1.5	$1.333 - 0.666 = 0.667$
2	1	5	$1 - 0.2 = 0.8$
3	1.5	∞	0.666

在文献[17]中，另外一个结果是关于亮度、瞳孔直径和物体大小对焦深（弧分）的影响。亮度越大，瞳孔的直径越小。在 0.03 cd/m^2 时，直径为 6 mm；在 30 cd/m^2 时，直径为 3 mm；在 300 cd/m^2 时，直径仅为 2 mm。瞳孔的直径线性下降与亮度的对数增加有关。直径减少 1 mm，焦深增加 0.12 屈光度。物体增大 0.25 弧分，焦深增加 0.35 屈光度。2 弧分的物体大小，其焦深达到 2 屈光度。

图 1.3 的结果对于 3D 显示器是非常重要的，观众仅仅在离屏幕给定的距离才能看见清晰的图像，图 1.3 揭示了当观众向前或者向后移动多少，仍然可以感知一幅令人满意的图像。

表 1.2 给出根据注视点 C 的距离景深的更新数据^[18]。显然，随着注视点距离的增加，景深也大大增加。于是，对于较大的距离，对给定点的定位或者位置不再这样重要。因此，对于位置和视差的失配，位置引起不舒适感的作用很小。对于在 0.5 m 或者更近的注视点，这一点不再正确，意味着对于近眼显示器，引起不舒适感当然是一个问题。对于常规的 3D 显示器，观察距离至少为 2 m，可以充分减小不舒适感，这一点在上文已经陈述。

表 1.2 表 1.1 中数据的更新值

注视点 C 的距离	景深低端的距离	景深高端的距离
0.5	0.4	0.67
1	0.67	z
2	1	∞

从这个结果来看，从较远的距离观看 3D 电影时的不舒适感并非经常发生。然而，情况并非如此，因为存在一个不同的效应被认定为不舒适的原因将在 1.6 节中讨论。

立体显示器和自由立体显示器只是提供了 3D 感知的一种错觉。位置和视差失配导致深度感知的冲突，由此引起的障碍造成其他的效应，这是其中之一。与之相反，在后面论述的集成成像显示器、全息术显示器和体显示器中，不会出现这种失配现象。当观众移动时，感觉是在绕着 3D 物体行走，因此具有真 3D 的体验。另一方面，在立体 3D 显示的方案中，观众看到的始终是相同的图像。

1.3 视差的距离定标

在立体视觉中,存在两种深度或者感知距离的定义。以自我为中心的视图是指观众与物体之间的常规距离 D , 常常以 m 为单位。另一方面,相对深度是基于观众和双眼单视界圆的基准点之间的深度间隔,并以在图 1.1 中视网膜的视差 γ 的弧度来测量。视差信息 γ 与 D 的联系是通过图 1.1 所示的几何形状产生的很强的非线性关系。这种关系必须不时地近似或重新校准,换句话说,根据不同区域的距离 D 定标^[19,20]。

为了获得真实的或正确的值,以自我为中心的距离信息 D 和相对深度 γ 是大脑需要的。假定大脑结合双目视差 γ 与以自我为中心的距离线索作为视差定标处理的信号,对于在现实世界的场景中一个很大的距离 D , 视差 γ 变化的幅度近似于 D^2 的倒数,可以从图 1.1 中的几何关系中直观地看到。我们发现, γ 也与瞳距 b 成正比。得出公式

$$\gamma = \frac{bd_0}{D^2} \quad (1.3)$$

其中, d_0 具有 cm 弧分的量级,是一个需要实验确定的比例系数,称为深度间隔;有时也称为预测深度^[21]; d_0 对于每个 D 是不同的,并近似于 D 附近一个区间的常数。

在立体显示中,视差 γ 近似取决于 3D 感知所要求的两幅图像之间的间隔 S , 并与观察距离 D 成反比,因此

$$\gamma = S / D \quad (1.4)$$

对于式 (1.4), 要求视网膜上的目标和对称辐辏接近于对称分割物体的中矢面。

对于 S 的固定值, 立体显示将提供深度间隔 d_0 , 如

$$d_0 = \frac{DS}{b \pm S} \quad (1.5)$$

在分母中的“+”号适用于交叉视差,“-”号适用于非交叉视差。在文献[22]中发现,对于两幅视图中不同的亮度, d_0 的确定具有很强的鲁棒性。如果亮度超过 0.63 cd/m^2 , 两眼间 60% 的亮度差异不影响深度间隔 d_0 的感知。然而,对于更大的两眼间亮度差异,感知的深度远远偏离正确值。另一个与亮度相关的影响是两眼间亮度差异大于 25% 将造成不舒适的感觉。最后,两眼间高达 83% 的对比度差异不影响深度感知,而在这种情况下,不舒适感的阈值在 25%~50%。

1.4 两眼间的串扰

视图信息从一只眼睛泄漏到另一只眼睛称为串扰,串扰常常严重地损伤感知图像的质量,而且影响两幅图像的融合。在没有串扰时,融合的极限值对于交叉视差为 27 弧分,