



EYE TRACKING METHODOLOGY

Theory and Practice
Second Edition

眼动跟踪技术： 原理与应用（原书第二版）

[美] Andrew T. Duchowski 著
赵歆波 邹晓春 周拥军 译



眼动跟踪技术：原理与应用

(原书第二版)

Eye Tracking Methodology: Theory and Practice
(Second Edition)

[美] Andrew T. Duchowski

赵歆波 邹晓春 周拥军 译



科学出版社

北京

图字:01-2011-0916

内 容 简 介

这是一本全面论述眼动跟踪原理与应用的专著。眼动跟踪技术近年来取得了飞速发展,技术创新层出不穷,应用领域日新月异。为此,作者在前一版的基础上,修订而成此书。全书共四部分,用20章的篇幅全面、系统地阐述了眼动的生理心理机制、眼动跟踪系统开发原理、眼动跟踪方法论以及典型眼动跟踪应用。本书特色鲜明,内容新颖,图文并茂,理论和实用性强,是一本不可多得的有关眼动跟踪的专著。

本书适合作为心理学、工业工程、市场营销、计算机科学等领域从事眼动跟踪及其应用研究的大学教师和科技工作者、研究生、大学本科高年级学生及工程技术人员的参考用书。

Translation from the English language edition:
Eye Tracking Methodology by Andrew Duchowski
Copyright © Springer-Verlag London Limited 2007
Springer-Verlag London is part of Springer Science+Business Media, LLC
All Rights Reserved

图书在版编目(CIP)数据

眼动跟踪技术:原理与应用:原书第2版/(美)达克沃斯基(Duchowski, A. T.)著;赵欲波,邹晓春,周拥军译. —北京:科学出版社,2015.5
ISBN 978-7-03-044407-3

I. ①眼… II. ①达… ②赵… ③邹… ④周… III. ①眼动-视觉跟踪
IV. ①Q811

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第110766号

责任编辑:钱 俊 / 责任校对:彭 涛
责任印制:徐晓晨 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年6月第一版 开本:720×1000 B5

2015年6月第一次印刷 印张:18 1/2

字数:347 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

译者序

眼睛是心灵的窗户,眼睛运动规律的研究提供了一条极为有用的途径,让人类透视自己的"思维"。事实上,这可能是当前科技允许的条件下,探知人类注意力最为直观的一条线索。正因为如此,眼动跟踪这个神奇的研究方向,吸引了一大批各学科领域的探索者。此类研究最早的记录见于18世纪80年代。但直到20世纪30年代,由于第一台非侵入式眼动仪的发明,眼动跟踪及其应用的研究才开始普及。近年来,随着光电子技术、计算机技术、生物医学工程和图像处理技术等的高速发展,眼动跟踪的应用领域,也从早期对于人类心理活动的研究,飞速拓展到医学、工业工程、军事、教育、体育等众多领域,成为当前各科技强国投入巨资的研究热点,展现出如火如荼的发展趋势。

美国克莱姆森大学 Andrew T. Duchowski 教授的这本书,是最早全面、系统论述眼动跟踪原理与应用的专著,全书分四部分,共20章,至今已是第二版。由于该书源于为大学高年级学生和研究生编写的讲义,并经过教学和学生学习实践的考验发展而成,因此该书内容丰富、特色鲜明、图文并茂、概念清楚,是相关人员进入眼动跟踪领域的入门书,也是他/她们的一本必读书。

2007年,译者在该书的指导下,开始眼动跟踪的研究,为了尽可能准确地翻译该书的内容,参加翻译的人员都是具有丰富眼动跟踪研究经验的学者,全书的第一部分由赵歆波教授翻译,第二部分和第三部分由邹晓春同志翻译,第四部分由赵歆波、邹晓春、周拥军三位译者合作完成,最后由赵歆波教授进行了统一整理与审校。

本书在翻译过程中得到了许多人的帮助,如研究生满毅、荆明、李娜,感谢他们的辛勤工作。译者感谢科学出版社给予我们这样一个难得的机会,并特别感谢钱俊、王飞龙先生为推动本书译制所做的贡献。由于本书内容包罗万象,涉及医学、心理学、工业工程、计算机科学等众多学科交叉,专业术语不可胜数,由于译者水平所限,虽极尽全力做到译文准确、术语统一,但不妥之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

赵歆波

2015年6月于西北工业大学

第二版前言

自第一版出版后,眼动跟踪技术在短短几年里取得了一些重要的进步。更重要的是,眼动跟踪技术有了显著改善。由于计算机处理器速度的增加和计算机视觉技术的改进,眼动跟踪制造商已经开发出了如下所列的四代设备。

第一代:埋置式眼动测量技术,如巩膜接触镜/测定线圈、眼电图法。

第二代:图像和视频眼动图法。

第三代:基于模拟视频并结合瞳孔/角膜反射的眼动测量法。

第四代:基于数字视频并结合瞳孔/角膜反射的眼动测量法,此类方法的实现基于计算机视觉技术和数字信号处理器(DSP)。

通常情况下,最理想的眼动跟踪输出类型(如人机交互可用性研究)是对观察者注视点(point of regard, POR)投影的估计,即用户视线在计算机显示器上的 (x, y) 坐标。第一代和第二代眼动仪一般不提供这种类型的数据。对于第二代系统,眼动分析依赖于人对图像或视频帧离线的一帧一帧的肉眼观察,因此,很难轻易完成 POR 的计算。基于视频瞳孔/角膜反射原理实现的眼动仪在经过标定之后,很容易提供 POR 坐标,这已成为当代眼动仪的基本功能。由于快速模拟数字视频处理器的使用,第三代眼动仪能够实时完成 POR 计算。近年上市的第四代眼动仪使用了数字光学器件,由于使用了集成的数字信号处理器,眼动跟踪技术在降低成本的同时,其易用性、精确性和处理速度获得了显著提高。

下表通过对新旧设备功能的简单对比,说明眼动跟踪技术的现状。对于初读本书和不了解眼动跟踪设备的读者,可以暂时跳过表中的对比,阅读并思考后面表中列出的新旧眼动仪的使用方法。

眼动仪功能比较

比较方面	先前系统	目前系统
技术	模拟视频	数字视频
标定	5~9 个点	任意点
控制	机器控制	应用控制
光学	手动对焦/阈值	自动对焦
通信	串口(流处理)	TCP/IP(主机、客户端)
同步	状态字节字	API 回叫

眼动仪使用过程比较

旧系统的典型使用过程	新系统的典型使用过程
<ol style="list-style-type: none"> 1. 登录控制台 2. 打开眼动设备 3. 打开眼睛/场景监视器 4. 打开眼动计算机 5. 运行眼动程序 6. 打开照相机 7. 打开照明控制 8. 调整头拖或者下巴支撑器 9. 调整平移/倾斜装置 10. 调节照相机照射区域 11. 调节照相机焦点 12. 调整瞳孔/角膜阈值 13. 标定校准 14. 运行 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 登录控制台 2. 打开眼动计算机 3. 运行眼动程序 4. 标定校准 5. 运行

不同光学器件(照相机)的使用导致新旧眼动系统使用上的差异。新系统趋向于使用自动聚焦数字照相机,例如,将照相机嵌入平板显示器中,这在一定程度上限制了用户使用仪器时的位置,但是这个位置一般会被设置在一个对用户而言舒适的范围内(如 50~60cm 焦距位置)。与旧系统不同,只要用户坐在这个范围内,就不再需要下巴支撑器和进一步的参数调整。与此相反,旧系统需要使用平移/倾斜装置定位照相机,照相机必须手动聚焦和缩放镜头,此外,还要给软件设置适当的瞳孔/角膜反射检测阈值,而新系统不需要这些烦琐的操作。

新系统一个最重要的特点是开发者可以自己完成标定,这对开发应用程序而言尤其重要。相应地,当开发者采用旧系统测试一个新功能时,必须招募一个非常有耐心的实验对象进行测试,这是很大的问题。新系统的标定技术相对于旧系统(第三代)有了长足的进步,因而显著加快了程序和应用技术的开发速度。

本书第一版是基于第三代眼动跟踪技术撰写的,第三代眼动仪曾广泛应用于大部分眼动跟踪研究。新系统的出现促成了第二版的写作。因此,第二版填补了第一版缺少的一些重要内容,包括以下内容。

- (1) 基于客户机/服务器模式的眼动跟踪客户端应用程序开发。
- (2) 客户端控制的显示、校准和数据采集。
- (3) 新的编程实例。

除了更新客户端编程的技术说明,本书还包括第一版所没有的眼动仪使用的方法论概述,指的是为进行眼动跟踪研究所需要的实验设计方法。第二版简要综述了实验设计方法,提供了一些将眼动度量指标用于研究(如可用性)的指导方针,

并提供了研究案例。

最后,本书扩充了第三部分“眼动跟踪方法论”的内容。由于新技术的驱动而涌现了大量新兴的、令人兴奋的眼动跟踪研究工作。事实上,从眼动跟踪和眼动的研究报告中已可窥见令人振奋的转变。因此,本书作者将描述的重点放在由用户注视点和注意力所呈现的客观证据所支撑的科学成果上,而不是眼动仪令人兴奋的技术进步以及获取眼动数据的技术内幕上。眼动跟踪技术似乎最终进入了主流科学研究领域,眼动仪不再是稀罕物,而是一种工具。希望第二版能够激励读者进行简单的眼动跟踪应用(由于第四代眼动仪的使用,这已经很容易了),并在新的眼动应用和科学探索的道路上继续前行。

Andrew T. Duchowski

2006年4月于美国南卡罗来纳州克莱姆森大学

第一版前言

本书的研究范畴局限于相当狭窄的人机交互领域(它描述了一种特定的输入方式),但是眼动跟踪涵盖了广泛的领域,包括跨学科研究和应用主题。至少有三个领域从眼动跟踪研究中受益:视觉感知、人机交互和计算机图形学。这些主题的融合形成了共生关系,图形技术产生从 2D 图像到 3D 沉浸式虚拟世界丰富的视觉刺激。而视觉注意力和感知的探索研究反过来又影响了新一代人工场景和虚拟世界的生成。源自这些学科的应用创造出一个功能强大的人机交互形式,即基于用户注视知识的人机交互。

眼动跟踪技术的最新进展,特别是更便宜、更快、更精确和更易用的眼动仪的出现,进一步推动了眼动(eye movement)和眼动跟踪(eye tracking)的研究工作。然而,尽管眼动仪(eye tracker)能从独特且客观的视角解释人类视觉和注意力过程,但是,除了不同的研究实验室利用眼动仪开展一些研究工作外,该类仪器还没有得到广泛的使用。眼动仪不被广泛接受的原因有两个。第一,缺乏大规模的在应用实验环境中使用眼动仪的讲授和培训课程。因此,需要一本有助于讲授和培训眼动跟踪技术的书。热情的眼动仪用户由于新买的眼动仪很难设置和操作而变得灰心,这种情况并不少见。只有少数学术部门(如心理学和计算机科学)提供使用眼动跟踪设备的所有指南。第二,针对眼动跟踪方法论的培训更是稀缺,甚至系统开发指令也只有几条。建立眼动跟踪实验室并将眼动仪与现存计算机系统结合,以开发基于注视的应用,是相当复杂的工作,这类类似于虚拟现实项目的开发和集成。迄今为止,除了本书以外没有其他书提供这类底层信息。

本书的写作目的是为注视点跟踪系统的实现提供技术细节,讲解眼动、视觉感知和视觉注意的理论知识。本书的文字来源于作者在将商业眼动仪应用于虚拟现实图形系统时的个人笔记。这些技术方面的考虑覆盖了本书中间章节、将商业眼动仪集成到 3D 虚拟环境,以及 2D 图像显示应用等方面的内容。来源于个人笔记的相关理论综述章节用于跨学科的眼动跟踪方法论课程(用于教授本科生和研究生,这些学生来自四个专业,即心理学、市场营销、工业工程和计算机科学)。这些笔记的早期版本出现在 2000 年 SIGGRAPH 会议之图形组下的特殊兴趣小组的短期课程上。该会议于 2000 年 7 月 23~28 日在洛杉矶新奥尔良举办,由美国计算机协会(ACM)组织。

总结

本书分为四部分,采用自上而下的方式展开各个主题的讲解。首先介绍人类视觉系统(第一部分),之后给出眼动跟踪系统的简单综述(第二部分),然后探讨眼动跟踪方法论(第三部分),最后回顾一些典型的眼动跟踪应用(第四部分)。

在本书的第一部分“人类视觉系统介绍”中,作者主要从历史的角度介绍视觉注意力的概念。第1章重点介绍中央凹视觉和周边视觉(“什么”与“哪里”),内容包括那些很容易观察到的注意力现象。第2章介绍 HVS 神经学的基质,呈现为和人类动态视觉相关的底层神经元素,讨论主要的双通道,即细小细胞和大细胞通道,它们与由视网膜中央凹和外围视觉产生的视觉信息流相对应。在讲述了视觉“硬件”之后,本书在随后的关于视觉感知的章节,总结了人类视觉的显著特征,主要是从心理物理学得到的结果,区分了中心凹和周围视觉感知。第一部分在讨论了中央凹转移机制(眼动)后结束。在讲述了眼动的神经学和精神物理学知识后,后续关于眼动分类和模型内容的章节,给出了眼动的基本术语以及可记录眼动波形的信号分析描述。

在本书的第二部分,即“眼动跟踪系统”中,首先简要综述了现有不同类型的眼动跟踪设备,随后给出了关于系统安装的需求以及应用程序开发的详细技术说明。这些技术说明主要适用于基于视频和角膜反射原理实现的眼动仪,这是目前应用最广泛、最经济适用的眼动仪。本书这部分给出了开发三个通用系统的信息,这三个系统分别是虚拟现实中的双目三维眼动跟踪系统、面向 2D 显示器的(如可以显示图形的监视器)单目 2D 眼动跟踪系统和桌面式双目 2D 眼动跟踪系统。因为前两个系统基于相同的(旧式)眼动跟踪硬件(如 ISCAN 眼动仪),所以对它们的描述非常相似。而对第三个系统的描述则基于 Tobii 公司的现代眼动跟踪技术,所有系统的描述都包括了系统标定。这部分最后介绍了独立于任何特定眼动跟踪硬件的数据收集和分析。

本书第四部分综述一些有趣且具有挑战性的眼动跟踪应用,这些应用来自心理学、人因工程、市场营销及广告、人机交互及协同系统、计算机图形和虚拟现实。

如何阅读本书

本书针对跨学科的读者,尤其是对心理学、市场营销、工业工程和计算机科学感兴趣的读者。事实上,本书适用于来自上述专业,选择了涉及眼动跟踪技术课程的本科生和研究生,此类课程的典型例子是笔者在克莱姆森大学讲授的眼动跟踪方法论课程。在这门课程中,所有章节的内容基本都包括在内,但不一定是本书的

顺序。在这样的课程中,章节顺序建议如下。

首先,第四部分概述了各种眼动跟踪应用。通常而言,这部分可以帮助读者设计和实施一学期的眼动跟踪项目。这部分内容可以通过阅读不同来源的研究论文予以增补。例如,可以选择来自下面这些会议的论文: The Proceedings of the Eye Tracking Research & Applications (ETRA) Conference、The Proceedings of the ACM Special Interest Group on Human-Computer Interaction (SIGCHI) Conference (Human Factors in Computing) Transactions on Graphics、The Proceedings of the Annual Association for Computing Machinery (ACM) Special Interest Group on Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH) Conference Series、The Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society (HFES)。

为了加快眼动跟踪应用的发展,第二部分紧接着第四部分,介绍开发眼动跟踪应用的技术细节。学生能够开发的应用类型主要取决于跨学科学生团队的编程经验。例如,在克莱姆森大学的眼动跟踪方法论课程中,研发团队是由计算机科学专业的学生联合一个或多个专业的学生(这些学生选择了诸如市场营销、心理学或工业工程等课程)。尽管所有小组成员研发的是同一个项目,但是来自其他专业的学生则主要负责最终眼动跟踪实验的设计和分析。

讲授了眼动跟踪应用之后,就可开始第三部分的讲解了,这部分介绍实验的设计。在可用性测量框架的情况下,眼动跟踪方法论课程鼓励性能测量,因此将专注于实验室实验和定量数据分析。

最后讲解第一部分,这部分介绍眼动跟踪初步研究中必要的理论背景。因此,尽管本书是按自上而下的顺序编排的,但课程讲解则采用自下而上的顺序。

本书也适合于对建立眼动跟踪实验室和(或)对使用眼动仪进行实验感兴趣的研究人员。因为这些读者可能来自不同的专业,如市场营销、心理学、工业工程和计算机科学,并非本书所有的内容都适合每个人。从事技术研究的读者可能对本书中间章节感兴趣,这部分详细介绍了系统的安装和眼动跟踪应用软件的开发。不直接涉及这种低层技术细节的读者不妨忽略这些章节,重点阅读本书前面讲解理论和历史内容的章节。本书后半部分讲解眼动跟踪应用,由于讲解了目前眼动跟踪研究的例子,所以可能适合所有读者。

致谢

本书的撰写工作由克莱姆森大学创新基金(编号:1-20-1906-51-4087)、美国航空航天局(NASA) Ames 任务(编号:NCC 2-1114)和 NSF CAREER 奖(编号:

9984278)共同资助完成。

本书的准备工作得到了许多人的帮助,包括 Keith Karn、Roel Vertegaal、Dorion Liston 以及在本书早期版本的写作过程中提供建议的 Keith Rayner。本书草稿的后续版本由外校审稿人审阅,他们的意见极大地加快了本书最终版本的成形,在此向他们表示深切的感谢。我要特别感谢 David Wooding 为本书所做的细致、全面的审阅工作。

感谢 Springer 出版团队帮助我出版本书,感谢 Beverly Ford 和 Karen Borthwick 鼓励我撰写本书,感谢 Rosie Kemp 和 Melanie Jackson 在本书最后出版阶段对我的帮助。同时,非常感谢 Catherine Brett 帮助我出版本书第二版。

特别感谢 Bruce McCormick,我在德州农工大学攻读博士学位期间,他一直强调编著本书的重要性。最后,特别感谢我的妻子 Corey,她耐心地聆听我对眼动跟踪技术不着边际的谈论,同时作为我的一个非常有耐心的眼动跟踪实验对象。

用从论文中搜集的和学到的知识写成本书,我获得了相当大的愉悦和享受。我希望本书的读者和我一样,在探索视觉和眼动时,也能从中获得类似的快感,然后继续实施更加有趣和引人入胜的项目,祝您愉快!

Andrew T. Duchowski

2002年6月和2006年7月于美国南卡罗来纳州克莱姆森大学

目 录

译者序

第二版前言

第一版前言

第一部分 人类视觉系统介绍

第 1 章 视觉注意力	3
1.1 视觉注意力:历史回顾.....	4
1.1.1 Von Helmholtz 的“哪里”假设.....	4
1.1.2 James 的“什么”假设.....	4
1.1.3 Gibson 的“怎么”假设.....	5
1.1.4 Broadbent 的“选择性滤波”理论.....	5
1.1.5 Deutsch J A 和 Deutsch D 的“重要权重”理论.....	5
1.1.6 Yarbus、Noton 和 Stark 的“扫描”路径理论.....	7
1.1.7 Posner 的“聚光灯”理论.....	9
1.1.8 Treisman 的“整合”理论.....	9
1.1.9 Kosslyn 的“窗口”理论.....	9
1.2 视觉注意力和眼动跟踪.....	10
1.3 总结和导读.....	11
第 2 章 人类视觉系统的神经底质	13
2.1 眼睛.....	16
2.2 视网膜.....	17
2.2.1 外层.....	19
2.2.2 内核层.....	19
2.2.3 神经节细胞层.....	19
2.3 视束和 M/P 视觉通路.....	20
2.4 枕叶皮质及以上区域.....	22
2.5 总结和导读.....	23
第 3 章 视觉心理物理学	25
3.1 空间视觉.....	25
3.2 时间视觉.....	28
3.2.1 周边视觉的运动感知.....	30

3.2.2	在视觉边缘检测运动的灵敏度	30
3.3	色彩视觉	31
3.4	视觉显示注意力设计的启示	32
3.5	总结与扩展阅读	32
第4章	眼动的分类与模型	34
4.1	眼外肌与眼动系统	34
4.2	跳视	36
4.3	平滑尾随	38
4.4	注视	39
4.5	眼球震颤	39
4.6	眼动分析的意义	39
4.7	总结与进一步阅读	40
第二部分 眼动跟踪系统		
第5章	眼动跟踪技术	43
5.1	眼电图法	43
5.2	巩膜接触镜/搜索线圈法	44
5.3	眼图照片或眼图录像法	45
5.4	基于视频的瞳孔/角膜反射法	46
5.5	视线跟踪与动作捕捉	49
5.6	总结与进一步阅读	50
第6章	头戴式系统的硬件安装	51
6.1	集成的关键和要求	51
6.2	系统安装	54
6.3	克莱姆森大学系统安装中的经验教训	55
6.4	总结与进一步阅读	56
第7章	头戴式系统软件开发	58
7.1	眼动仪系统屏幕坐标系的映射	58
7.1.1	将屏幕坐标系映射到三维视锥	59
7.1.2	屏幕坐标系到二维图像的映射	60
7.1.3	测量眼动仪系统屏幕坐标系范围	60
7.2	鸟群跟踪器坐标映射	62
7.2.1	获得变换的视线矢量	63
7.2.2	获取变换的向上矢量	64
7.2.3	任意矢量变换	64
7.3	3D 注视点计算	65

7.4	虚拟的视线交点坐标	68
7.4.1	线与平面的交点	68
7.4.2	点在多边形内问题	70
7.5	数据表示与存储	71
7.6	总结与进一步阅读	72
第8章	头戴式系统的标定	73
8.1	软件实现	75
8.2	辅助标定程序	79
8.2.1	内部二维标定	79
8.2.2	内部三维标定	81
8.3	总结及进一步阅读	83
第9章	桌面式系统硬件安装	84
9.1	集成问题及需求	85
9.2	系统安装	86
9.3	从克莱姆森硬件安装中学到的课程	88
9.4	总结和进一步阅读	89
第10章	桌面式系统软件开发	90
10.1	Linux Tobii 客户端应用程序界面	91
10.1.1	Tet_Init	91
10.1.2	Tet_Connect 和 Tet_Disconnect	92
10.1.3	Tet_Start, Tet_Stop	92
10.1.4	函数 Tet_CalibClear、Tet_CalibLoadFromFile、Tet_CalibSaveToFile、 Tet_CalibAddPoint、Tet_CalibRemovePoints、Tet_CalibGetResult、Tet_ CalibCalculateAndSet	93
10.1.5	Tet_SynchronizeTime 和 Tet_PerformSystemCheck	95
10.1.6	Tet_GetSerialNumber、Tet_GetLastError 和 Tet_GetLastErrorAs Text	95
10.1.7	Tet_CallbackFunction	96
10.2	一个 OpenGL/GLUT 图形用户界面的简单样例	97
10.3	警告	104
10.4	结论和进一步阅读	104
第11章	桌面式系统标定	105
11.1	软件实现	106
11.2	总结和进一步阅读	113
第12章	眼动分析	114

12.1	信号去噪	115
12.2	基于停留时间的注视点检测	117
12.3	基于速度的扫视检测	118
12.4	三维眼动分析	120
12.4.1	参数估计	124
12.4.2	注视分组	127
12.4.3	眼动数据镜像	128
12.5	总结与进一步阅读	128
第三部分 眼动跟踪方法论		
第 13 章	实验设计	131
13.1	形成假说	131
13.2	查询形式	132
13.2.1	实验对观察研究	133
13.2.2	实验室对现场研究	133
13.2.3	特殊规律研究对一般规律研究	134
13.2.4	样本人群对单例实验对案例研究	134
13.2.5	个体自我设计与受试间设计	135
13.2.6	样例设计	136
13.3	测量值与分析	138
13.4	总结与进一步阅读	141
第 14 章	建议的实验指南	143
14.1	评估计划	144
14.1.1	数据收集	144
14.1.2	系统识别	147
14.1.3	约束	147
14.1.4	用户选择	148
14.1.5	现场评估	148
14.1.6	任务选择	148
14.2	实践建议	149
14.3	考虑动态刺激	150
14.4	总结与进一步阅读	150
第 15 章	案例学习	152
15.1	头戴式 VR 诊断:视觉检测	152
15.1.1	案例研究便笺	154
15.2	头戴式 VR 诊断:三维迷宫导航	154

15.3	桌面 VR 诊断:驾驶模拟器	155
15.4	桌面诊断:可用性	157
15.5	桌面交互:注视跟随鱼眼镜头	166
15.6	总结与进一步阅读	169
第四部分 眼动跟踪的应用		
第 16 章	眼动跟踪技术应用的多样性和种类	173
16.1	总结与进一步阅读	174
第 17 章	神经科学与心理学	175
17.1	错觉等高线的神经生理学研究	175
17.2	注意神经科学	176
17.3	眼动与脑成像	179
17.4	阅读	180
17.5	场景感知	183
17.5.1	艺术感知	186
17.5.2	电影感知	189
17.6	视觉搜索	189
17.7	自然任务	198
17.8	在其他信息处理任务中的眼动	201
17.9	总结与进一步阅读	203
第 18 章	工业工程与人因工程	204
18.1	航空	204
18.2	驾驶	207
18.3	视觉检测	212
18.4	总结和进一步阅读	220
第 19 章	营销与广告	221
19.1	广告文案测试	222
19.2	印刷广告	223
19.3	广告位置	226
19.4	电视增强	228
19.5	网页	229
19.6	商品标签设计	231
19.7	总结与进一步阅读	232
第 20 章	计算机科学	234
20.1	人机交互与协同系统	234
20.1.1	经典的基于眼睛的交互	234

20.1.2	认知建模	235
20.1.3	全局易用性	237
20.1.4	间接的基于眼睛的交互	239
20.1.5	注意力用户界面	240
20.1.6	可用性	241
20.1.7	协同系统	242
20.2	注视跟随显示	243
20.2.1	基于屏幕的显示	244
20.2.2	基于模型的图形显示	249
20.3	总结和进一步阅读	256
	总结	258
	参考文献	259