



华夏英才基金学术文库

王涌天 陈靖 程德文 著

增强现实技术导论



科学出版社

 华夏英才基金学术文库

增强现实技术导论

王涌天 陈 靖 程德文 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

增强现实技术的目标是将计算机生成的虚拟环境与用户周围的现实环境融为一体,使用户从感官效果上确信虚拟环境是其周围真实环境的组成部分。因此,增强现实技术具有虚实结合、实时交互、三维注册的特点。围绕这三方面,本书主要介绍增强现实系统的标定方法、实现虚拟与真实环境无缝融合的显示设备、有标识的六自由度跟踪注册技术、无标识的六自由度跟踪注册技术以及适用于移动终端的增强现实系统,并给出了典型的应用实例,包括基于增强现实技术的轻量级飞行模拟器开发和基于增强现实技术的圆明园数字重现定点观察设备。

本书可作为计算机、信息工程等相关专业高年级本科生、研究生的教材以及相关领域研究人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

增强现实技术导论 / 王涌天,陈靖,程德文著. —北京:科学出版社,2015.6
ISBN 978-7-03-044025-9

I. ①增… II. ①王…②陈…③程… III. ①数字技术—研究
IV. ①TP391.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第064846号

责任编辑:孙伯元 陈 婕 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂 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 1/16

2015年6月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:290 000

定价:128.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

20世纪90年代初,伴随着虚拟现实(virtual reality,VR)技术的发展,增强现实(augmented reality,AR)技术应运而生。增强现实技术是虚拟现实技术的一个重要分支。它借助显示技术、交互技术、传感技术和计算机图形技术将计算机生成的虚拟物体与用户周围的现实环境融为一体,使用户从感官效果上确信虚拟物体是其周围环境的组成部分。因此,增强现实技术具有虚实融合、实时交互、三维注册的特点,在军事、医疗、科研、工业、教育、培训、文化、娱乐等领域都有着广泛的应用前景。

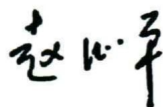
十多年前,增强现实技术对于大众来说或许还是一个抽象的概念,那时的增强现实技术还处于实验室研究阶段。在虚实融合方面,由于增强现实技术需要同时融合现实世界与虚拟世界,因此研究的重点主要是设计开发能够实现虚实融合显示的显示器设备,即不同种类的显示器原型系统,从头盔显示器、视网膜显示器、投影仪、手持式显示器到空间式显示器相继出现;在实时交互方面,电磁和光学人体动作跟踪器以及后期出现的语音、手势乃至体感交互技术,实现了人与虚拟和现实世界自然交互的愿望;在三维注册方面,重点是实现用户与自然场景间的实时六自由度位置和方位跟踪计算,更准确、更鲁棒、更实时的姿态计算算法是这一方向的研究重点。该技术经历了早期的基于标志物的六自由度跟踪注册,并逐渐过渡到基于自然特征的六自由度跟踪注册。从增强现实系统来讲,20世纪90年代末期的增强现实系统将用户局限在室内较小的工作范围内,用户的运动范围受限。21世纪初期开始出现了户外移动增强现实系统。虽然用户的运动范围得以扩展,但是受限于当时的技术条件,增强现实系统的重量以及便携性成为发展的瓶颈。而所有这些技术的进展基本都仅局限在实验室,不为大众所熟知。

近年来,随着增强现实技术以及移动互联网、高性能计算等技术的不断发展,结合自然场景的增强现实技术悄然走进了大众的视线。2009年,荷兰的一家软件公司面向智能手机开发的首款增强现实浏览器问世,预示着增强现实技术开始从实验室阶段迈向了商用阶段。2012年,谷歌眼镜的横空出世直接将增强现实技术这一陌生的科技名词推向大众,激发了人们对增强现实技术的研究热情。2015年初,微软公司全息眼镜产品的发布,更让业界为之振奋,一时好评如潮。佩戴上该

款头盔显示器,用户可置身于奇妙的增强现实世界中,实现了虚拟与真实环境的良好融合、自然的用户交互以及精准的三维定位,从而将数字化的信息世界与真实的三维世界紧密地联系起来。相信在不远的未来,增强现实技术的应用将会涉及人类生活的诸多方面,直接影响人们观察世界和理解世界的方式。

北京理工大学是国内最早开展增强现实关键技术研究的单位之一,从20世纪90年代末期就已着手研发适用于增强现实系统的头盔显示器与跟踪注册技术:先后设计开发了视频透视式增强现实头盔显示器与光学透视式头盔显示器;跟踪注册技术的研发也经历了从有标识跟踪注册到无标识跟踪注册的阶段性发展。21世纪初期,在有关政府部门的支持下,设计开发了基于增强现实技术的定点观察设备,并成功地将其应用于圆明园的数字化场景重现中。

该书是作者在多年从事增强现实技术研究的基础上所著,是国内第一部系统介绍增强现实的专著,从增强现实技术的概念与起源、增强现实的显示设备、标定技术、注册定位技术以及移动增强现实系统应用研究等几个方面全面详细地介绍了增强现实技术,并以轻量级增强现实飞行模拟器、定点增强现实观景器为例介绍了增强现实的实际应用。相信该书会给从事增强现实研究的科技工作者带来有益的启示,并对我国增强现实技术研究、应用系统开发和人才培养起到积极的推动作用。



2015年4月9日

前 言

智能手机、智能可穿戴设备,特别是谷歌眼镜的横空出世,激起了人们对增强现实技术的好奇心。人们希望能够拨开增强现实技术的面纱,一探究竟。增强现实技术本身是一个跨学科的研究领域,它综合使用了不同研究领域的多种技术,如虚拟现实技术、计算机视觉技术、人工智能技术、可佩戴移动计算机技术、人机交互技术、生物工程学技术等。其目标是将计算机生成的虚拟环境与用户周围的现实环境融为一体,使用户从感官效果上确信虚拟环境是其周围真实环境的组成部分。由此可见,为构建一个成功的增强现实系统,需要综合使用不同研究领域的技术,这对初学者而言是非常困惑的事情。增强现实系统都有哪些技术支撑?都需要使用哪些硬件设备?怎样构建一个成功的增强现实系统?这些是本书所要阐述的主要内容。

本书共 8 章。第 1 章主要阐述增强现实技术的概念、起源以及构成增强现实系统的主要关键技术;第 2 章重点介绍增强现实系统中不同类型的融合显示设备;第 3 章介绍增强现实系统的标定,包括视频透视式和光学透视式两种不同的增强现实系统标定方法;第 4 章介绍增强现实系统中较常采用的基于标识的跟踪注册算法及其基本原理;第 5 章就无标识跟踪注册算法进行详细介绍;第 6 章主要阐述移动增强现实系统的研究进展以及其在 Android 系统中的应用;第 7 章和第 8 章介绍两个不同的增强现实应用实例。

本书是在作者在虚拟现实与增强现实方面的研究生课程讲义的基础上形成的,目的是为初学者介绍增强现实系统的基本概念、理论知识以及构建增强现实系统所需要的主要技术手段和方法。通过阅读本书,读者可以对增强现实技术有全面、深入的了解,并对进入该研究领域进行知识准备。

完成本书的合作教师还有刘越教授、翁冬冬副教授。北京航空航天大学的梁晓辉教授对本书提出了宝贵的建议,在此表示感谢。在本书写作过程中,对本书的内容撰写做出贡献的研究生有李玉、张运超、桂振文、林一、许晨、梁杏、蔡郡、严雷、黄秀杰、曹若琛、孙磊等,以及一些已毕业的研究生,在此谨向他们表示最诚挚的感

谢。此外,本书在写作过程中参考了有关书籍和文献(见本书列出的参考文献),在此也向这些作者一并致谢。

增强现实技术是一个多学科交叉的新兴研究课题,由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者不吝指正。

目 录

序

前言

第1章 引言	1
1.1 增强现实技术的概念和发展	1
1.1.1 虚拟现实技术	2
1.1.2 增强现实技术	3
1.1.3 增强现实技术与虚拟现实技术的比较	4
1.1.4 增强现实系统的性能评价	6
1.2 增强现实系统中的硬件与软件包	7
1.2.1 增强现实系统中的硬件	7
1.2.2 增强现实系统软件包	16
1.2.3 增强现实技术的国内外研究机构	17
1.3 增强现实技术的难点	19
1.3.1 增强现实系统中的头盔显示技术	20
1.3.2 增强现实系统中的跟踪注册技术	22
1.3.3 增强现实系统的交互技术	24
1.4 增强现实技术的应用领域	27
参考文献	38
第2章 增强现实系统的显示技术	43
2.1 显示设备的分类及概述	43
2.1.1 屏幕显示器	43
2.1.2 头盔显示器	48
2.1.3 投影式头盔显示器	52
2.1.4 视网膜直接成像显示器	55
2.1.5 投影显示设备	56
2.1.6 智能可穿戴显示设备	60
2.2 头盔显示器的分类及其核心技术	61

2.2.1	自由曲面头盔显示器	61
2.2.2	全息波导型头盔显示器	62
2.2.3	几何波导型头盔显示器	63
2.2.4	高性能头盔显示技术	64
2.2.5	真实立体感头盔显示技术	66
2.3	增强现实头盔显示器的设计要点	73
2.3.1	头盔显示器的组成与原理	73
2.3.2	头盔显示器的光学系统设计要点	74
2.3.3	部分国内外头盔显示器的设计	77
	参考文献	80
第3章	增强现实系统的标定	86
3.1	摄像机的几何模型和坐标变换	86
3.1.1	图像坐标系与像素坐标系	87
3.1.2	图像坐标系与摄像机坐标系	87
3.1.3	摄像机坐标系与世界坐标系	88
3.2	摄像机标定	89
3.2.1	线性模型的摄像机标定	89
3.2.2	基于平面方格点的摄像机标定	92
3.2.3	非线性模型的摄像机标定	95
3.3	基于透视式头盔显示器的增强现实系统标定	95
3.3.1	视频透视式增强现实系统的标定	95
3.3.2	光学透视式头盔显示器的标定技术	96
	参考文献	104
第4章	基于标识的增强现实跟踪注册技术	106
4.1	基于标识的跟踪注册技术概述	108
4.2	常用的标识点	111
4.2.1	ARToolkit 方形标识点	111
4.2.2	SCR 标识点系统	116
4.2.3	环形标识点	118
4.2.4	Sony 计算机实验室标识点	121
4.2.5	室内装饰性人工标识	122
4.2.6	红外标识系统	125

4.3 各种人工标识系统中的识别定位算法比较	127
4.3.1 人工标识的形状	128
4.3.2 标识的颜色	128
4.3.3 定位标识区域	129
4.3.4 标识的可识别范围	129
4.3.5 特征点提取	130
4.3.6 标识的编码信息量	130
4.3.7 理想特征的概要	130
参考文献	130
第5章 无标识增强现实三维跟踪注册	134
5.1 基于场景平面的增强现实跟踪注册	135
5.1.1 系统初始化	135
5.1.2 摄像机位姿估计	136
5.1.3 实验结果	137
5.2 基于模型和关键帧的注册方法	138
5.2.1 3D 场景模型与关键帧的创建	138
5.2.2 选择参考图像帧	139
5.2.3 宽基线匹配	140
5.2.4 摄像机位姿求解	141
5.2.5 实验结果	142
5.2.6 算法评价	142
5.3 基于图像匹配的无标识跟踪注册方法	144
5.3.1 关键帧匹配	144
5.3.2 2D 图像匹配算法	145
5.3.3 实验结果	147
5.4 基于 SIFT 特征的无标识点跟踪注册方法	148
5.4.1 SIFT 特征描述算子	149
5.4.2 SIFT 关键点的匹配	150
5.4.3 基于 SIFT 特征的摄像机位姿估计	151
5.5 基于运动结构重建的跟踪注册算法	152
5.5.1 MonoSLAM 算法	152
5.5.2 PTAM 算法	153

5.6	混合跟踪注册	157
5.6.1	根据传感器类型分类	158
5.6.2	根据传感器融合方式分类	160
5.7	无标识跟踪注册算法的未来研究方向	162
	参考文献	163
第6章	移动增强现实系统	169
6.1	概述	169
6.2	移动增强现实系统的研究现状	171
6.2.1	移动增强现实技术的学术研究	171
6.2.2	移动增强现实技术的商业应用	174
6.3	面向智能手机的移动增强现实核心技术	178
6.3.1	主体结构框架	179
6.3.2	跟踪定位算法	181
6.3.3	海量场景的目标识别	183
6.3.4	人机交互方式	185
6.3.5	数据通信和传输	185
6.3.6	功耗	186
6.4	Android 系统开发环境	187
6.4.1	Android 操作系统	187
6.4.2	手机硬件环境和软件开发环境	189
6.4.3	OpenCV 库编译和基于 NDK 的开发	190
6.4.4	部分增强现实功能实现	191
	参考文献	199
第7章	增强现实技术的应用实例——轻量级飞行模拟器	203
7.1	增强现实轻量级飞行模拟器	203
7.1.1	系统功能	203
7.1.2	系统结构	204
7.1.3	座舱视景的虚实融合原理	206
7.1.4	样机系统实现与测试	208
7.2	改进型增强现实轻量级飞行模拟器	212
7.2.1	改进型增强现实飞行座舱系统设计	212
7.2.2	座舱头部跟踪系统的实验模拟	213

7.2.3 跟踪器的实验对比结果	214
参考文献	215
第8章 增强现实技术的应用实例——圆明园定点观景器	216
8.1 第一代定点增强现实观景器	216
8.2 第二代增强现实定点观景器	219
8.2.1 第二代增强现实定点系统的优点	219
8.2.2 第二代系统的构建	220
8.2.3 增强现实定点观景器的用户使用情况调查	221
8.3 AR-View 增强现实定点观景器	224
8.4 随动式增强现实定点观景器	226
8.4.1 系统构成	229
8.4.2 样机设备与操作使用	229

第 1 章 引 言

1.1 增强现实技术的概念和发展

在信息时代,人们处于计算机日益普及的世界中,从当初几人共享一台计算机的模式转变为一人拥有多台计算机。人们的生活、工作已离不开计算机生成的信息数据。但是,目前计算机仍处于智能化的初级阶段,只是帮助人类进行逻辑思维的有力工具,要使计算机成为人类进行形象思维的帮手,仍有较长的路要走。这一切首先要求计算机能够适应人们所习惯的信息获取方式和思维过程,与真实的环境进行自然融合,这也是计算机技术发展的趋势。图 1.1 展示了增强现实的概念,将虚拟的三维模型与周围的真实环境完美地融为一体。增强现实系统可以将计算机生成的信息(包括文字、图像、三维物体等)以视觉融合的方式叠加至真实场景中,在用户眼前呈现出“增强”了的世界。在理想情况下,用户无法辨别哪个是虚拟物体,哪个是真实物体,看到的将是完整的融合显示场景。因此,增强现实从字面上来说就是对现实的增强,而不是对真实环境的取代。



(a) 真实场景

(b) 虚实融合场景

图 1.1 圆明园的真实场景与圆明园虚实融合场景

增强现实(augmented reality, AR)是一种利用计算机产生的附加信息对使用者所看到的真实世界景象进行增强或扩张的技术,是跨学科的综合体。增强现实和虚拟现实(virtual reality, VR)联系非常紧密,是虚拟现实发展的扩展或者分支,也

是近年来的一个研究热点。增强现实系统综合使用了不同研究领域的多种技术,如虚拟现实技术、计算机视觉技术、人工智能技术、可佩戴移动计算机技术、人机交互技术、生物工程学技术等。因此,谈到增强现实时首先需要讨论虚拟现实。

1.1.1 虚拟现实技术

“虚拟现实”一词是由美国 VPL Research 公司的奠基人 Lanier 于 20 世纪 80 年代末首次正式提出的。他将虚拟现实描述为一种逼真地模拟人在自然环境中的视觉、听觉、运动等行为的人机界面技术。自从冯·诺依曼结构的计算机诞生以来,计算机的形式化、逻辑指令化和串行方式与人类与生俱来的形象化、模糊概念化、联想和并行接收处理信息的能力不协调。计算机的运行方式与用户的认识空间和信息空间之间存在鸿沟。从 1965 年 Sutherland 提出“计算机图形学”概念至今,人类一直致力于建立尽可能和谐理想的人机环境,这正是虚拟现实技术的历史渊源。

伴随着计算机软硬件技术和传感技术的发展,虚拟现实技术已经不仅以优化人机交互环境为目的,而且更多地结合了计算机仿真和图形学,并借助人类奇妙的想象力,为开拓人类的信息空间和认识手段提供了强有力的途径。虚拟现实系统实现了人与计算机之间通过语言、手势等自然方式进行信息交互,使用户逐渐从“主动适应”发展到“被适应”的地位。更重要的是,用户不仅能够通过虚拟现实系统感受到在客观物理世界中所经历的“身临其境”的逼真感,而且能够突破物理空间、时间以及其他客观限制,感受到在真实物理世界中无法亲身经历的体验。因此,虚拟现实技术具有超越现实的虚拟性。

虚拟现实系统的基本特征被描述为如图 1.2 所示的“沉浸-交互-构想”,即 immersion-interaction-imagination。上述三个特征在虚拟现实系统中相互影响并共同存在。虚拟现实的第一个特征是“沉浸”,又称为临场感、存在感,强调 VR 境界的逼真性,即用户在计算机所创建的三维虚拟环境中处于一种全身心投入的状态。该环境中的一切看上去是真的,听上去是真的,动起来是真的,甚至闻起来、尝起来等一切感觉都是真的,如同在现实世界中的感觉一样行动自如,让参与者有身临其境的感觉。第二个特征是“交互”,虚拟现实的交互特性主要通过虚拟现实系统中的交互接口设备实现,通过交互设备人们以自然的方式与虚拟现实环境进行交互操作。第三个特征是“构想”,强调对人类认知范围的扩展,不仅可以再现真实存在的环境,而且可以随意构想客观世界中不存在的,甚至不可能存在的环境。从图形学的角度来看,传统的计算机图形学强调了三维场景在屏幕上的二维显示。虚拟现实技术则强调三维场景的立体显示,并为参与者创建了在这个立体的三维虚

拟世界中的想象空间。上述三个基本特征使得 VR 技术区别于传统的计算机仿真、遥现技术、多媒体技术和科学计算可视化技术等。归结起来,虚拟现实的概念包括以下含义。

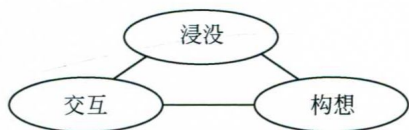


图 1.2 虚拟现实的三个特征图

(1) 虚拟环境是由计算机生成、实时动态、具有双眼立体视觉、三维听觉、触觉及嗅觉等感官信息表现的、逼真的三维图像环境,可以是某一特定现实世界的真实再现,也可以是虚构的世界。

(2) 理想虚拟现实技术的“实时感知”应该具有人的所有感知本领,包括视觉、听觉、触觉、嗅觉、味觉、力觉、运动等多种感知渠道。

(3) 使用“自然技能”是指计算机处理与人的头部转动、眼睛运动、手势和其他人体动作语言相对应的数据,对用户的输入作出实时响应,并分别反馈到感官。

(4) “传感设备”主要是指三维交互设备,包括立体头盔显示器、数据手套、三维鼠标和数据衣等。

虚拟现实技术综合了计算机仿真技术、计算机图形学、多媒体技术、人工智能技术、计算机网络技术、并行处理技术和多传感器技术模拟人的视觉、听觉、触觉等感官功能,旨在通过显示技术、交互技术、传感技术和计算机图形技术的手段,使用户从感官效果上沉浸在由计算机创造的虚拟环境中。目前,虚拟现实的应用已经涵盖了产品设计制造、模拟训练、远程医疗、太空探险、教育培训、科学研究、娱乐等各类军民领域。

1.1.2 增强现实技术

增强现实技术是借助光电显示技术、交互技术、多种传感技术和计算机图形与多媒体技术将计算机生成的虚拟环境与用户周围的现实环境融为一体,使用户从感官效果上确信虚拟环境是其周围真实环境的组成部分。因此,增强现实系统具有虚实结合、实时交互、三维注册的新特点^[1]。图 1.3 为 MIT 多媒体实验室开发的第六感装置,配合手势识别、人脸识别等先进技术,将计算机产生的虚拟信息直接投影至真实场景中^[2]。

图 1.4 为用户通过一个医疗教学增强现实系统可能看到的场景。该系统将人



图 1.3 MIT 多媒体实验室开发的第六感装置^[2]

脑解剖结构可视化,并准确地显示在观察对象的头部位置,用户将同时看到观察对象的头部外形与其大脑结构。系统不仅可以帮助医学院的学生学习大脑的解剖结构,还可以帮助手术医生准确定位手术部位,提高其临床技能^[3]。

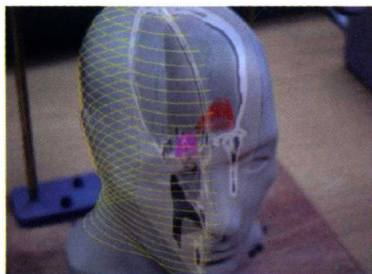


图 1.4 医疗教学增强现实系统^[3]

从上述应用可以看出,增强现实技术借助计算机图形技术和可视化技术产生现实环境不存在的虚拟对象,并通过传感技术将虚拟对象准确地“放置”在真实环境中,并借助显示设备将虚拟对象与真实环境融为一体,呈现给用户一个感官效果真实的新环境。

1.1.3 增强现实技术与虚拟现实技术的比较

增强现实技术是随着虚拟现实技术的发展而产生的,因此二者存在不可分割的纽带关系。虽然它们所需要的基础技术相同,但二者存在较大的区别。虚拟现实技术综合了显示技术、交互技术、传感技术和计算机图形等技术,使得用户从感官效果上沉浸在一个与其周围环境完全不同的虚拟环境中。而增强现实技术借助显示技术、交互技术、传感技术和计算机图形技术将计算机生成的虚拟环境与用户周围的现实环境融为一体,使用户从感官效果上确信虚拟环境是其周围真实环境

的组成部分。因此,构建一个增强现实应用系统的目的并非以虚拟世界代替真实世界,而是利用附加的信息增强使用者对真实世界的观察和感知。增强的信息可以是虚拟的三维模型,也可以是真实物体的非几何信息。形象地说,虚拟现实系统试图将世界送入使用者的计算机,而增强现实系统却是把计算机带进使用者的真实环境。可以说增强现实技术在虚拟环境与真实世界之间架起了一座桥梁。具体而言,增强现实技术与虚拟现实技术的差异主要体现在以下四方面^[4]。

(1) AR 与 VR 最显著的差别在于两者对于浸没感的要求不同。

VR 系统强调用户在虚拟环境中视觉、听觉、触觉等感官的完全浸没,强调将用户的感官与现实世界绝缘,使其沉浸在一个完全由计算机控制的信息空间(cyberspace)之中。这通常需要借助能够将用户视觉与现实环境隔离的显示设备,一般采用浸没式头盔显示器(immersive head-mounted display, IHMD)。而与之相反,AR 系统不仅不隔离周围的现实环境,而且强调用户在现实世界的存在性,并努力维持其感官效果的不变性。AR 系统致力于将计算机产生的虚拟环境与真实环境融为一体,从而增强用户对真实环境的理解。这就需要借助能够将虚拟环境与真实环境融合的显示设备,如透视式头盔显示器(see-through head-mounted display, STHMD)。

(2) AR 和 VR 关于注册(registration)的含义和精度要求不同。

在浸没式 VR 系统中,注册是指呈现给用户的虚拟环境与用户的各种感官匹配。例如,当用户用手推开一扇虚拟的门时,用户所看到的场景就应该同步地更新为屋子里面的场景,一条虚拟小狗向用户跑过来,用户听到的狗吠声就应该是由远及近变化的,这种注册误差是视觉系统与其他感官系统以及本体感觉之间的冲突。而心理学研究表明,视觉往往占了其他感觉的上风。而在 AR 系统中,注册主要是指将计算机产生的虚拟物体与用户周围的真实环境全方位对准,而且要求用户在真实环境的运动过程中维持正确的对准关系。较大的注册误差不仅不能使用户从感官上相信虚拟物体在真实环境中的存在性及一体性,甚至会改变用户对其周围环境的感受,改变用户在真实环境中动作的协调性,严重的注册误差甚至导致完全错误的行为。

(3) AR 可以缓解对系统计算能力的苛刻要求。

一般来说,要求 VR 系统精确再现人们周围的简单环境,需要付出巨大的代价,而其结果在当前技术条件下也未必理想,其逼真程度总是与人的感官能力不相匹配。而 AR 技术则是在充分利用周围已存在的大量信息的基础上加以扩充,这就大大降低了对计算机图形能力的要求。