

毕业设计（论文）检测系统

文本复制检测报告单 (全文标明引文)

№: BC202305220955567424562959

检测时间: 2023-05-22 09:55:56

篇名: 虚拟现实头眼协同对象操纵方法设计与实现

作者: 刘兆薰 (19373345)

指导教师: 王莉莉 (教授)

检测机构: 北京航空航天大学

文件名: 06_19373345_刘兆薰.pdf

检测系统: 毕业设计（论文）检测系统（毕业设计（论文）管理系统）

检测类型: 毕业设计论文（最终版）

检测范围: 中国学术期刊网络出版总库

中国博士学位论文全文数据库/中国优秀硕士学位论文全文数据库

中国重要会议论文全文数据库

中国重要报纸全文数据库

中国专利全文数据库

图书资源

优先出版文献库

大学生论文联合比对库

互联网资源 (包含贴吧等论坛资源)

英文数据库 (涵盖期刊、博硕、会议的英文数据以及德国Springer、英国Taylor&Francis 期刊数据库等)

港澳台学术文献库

互联网文档资源

CNKI大成编客-原创作品库

源代码库

时间范围: 1900-01-01至2023-05-22

检测结果

去除本人文献复制比: 0.2%

跨语言检测结果: -

去除引用文献复制比: 0.2%

总文字复制比: 0.2%

单篇最大文字复制比: 0.2% (基于融合传感的纱线瑕疵检测系统的研究)

重复字数: [50]

总段落数: [3]

总字数: [28602]

疑似段落数: [1]

单篇最大重复字数: [50]

前部重合字数: [0]

疑似段落最大重合字数: [50]

后部重合字数: [50]

疑似段落最小重合字数: [50]



文字复制部分 0.2%

引用部分 0%

无问题部分 99.8%

指标: ☐ 疑似剽窃观点 ☒ 疑似剽窃文字表述 ☐ 疑似整体剽窃 ☐ 过度引用

相似表格: 0

相似公式: 没有公式

疑似文字的图片: 0

0% (0)

0% (0)

虚拟现实头眼协同对象操纵方法设计与实现_第1部分 (总9849字)

0.5% (50)

0.5% (50)

虚拟现实头眼协同对象操纵方法设计与实现_第2部分 (总9867字)

0% (0)

0% (0)

虚拟现实头眼协同对象操纵方法设计与实现_第3部分 (总8886字)

(注释: 无问题部分 文字复制部分 引用部分)

相似文献列表

去除本人文献复制比：0%(0) 去除引用文献复制比：0%(0) 文字复制比：0%(0) 疑似剽窃观点：(0)

原文内容

单位代码 10006
学号 19373345
分类号 TP391.9
毕业设计（论文）
虚拟现实头眼协同对象操纵方法设计与实现
学院名称计算机学院
专业名称计算机科学与技术专业
学生姓名刘兆薰
指导教师王莉莉
2023 年 05 月
北京航空航天大学
本科生毕业设计（论文）任务书
I、毕业设计（论文）题目：
虚拟现实头眼协同对象操纵方法设计与实现
II、毕业设计（论文）使用的原始资料（数据）及设计技术要求：
针对虚拟现实设计并实现一套基于头眼协同的高效易用的对象操纵方法使用 C# 在 Unity3D 引擎中进行交互系统逻辑与代码开发使用 SteamVR 进行相关虚拟现实场景开发
使用 VIVE Focus 3 眼动仪获取、分析眼动数据
III、毕业设计（论文）工作内容：
头眼协同的场景与目标浏览头眼协同的目标选择头眼协同的对象操纵两个先导实验
两个用户实验
IV、主要参考资料：
M. Daniel, C. Ariel, G. Andrea, et al. A survey on 3d virtual object manipulation: From the desktop to immersive virtual environments: Survey on 3d virtual object manipulation[J]. Computer Graphics Forum, 2018.
C. Liu, A. Plopski, J. Orlosky. Orthogaze: Gaze -based three -dimensional object manipulation using orthogonal planes[J]. Computers & Graphics, 2020.
K. Kyungyoon, L. R. L., K. Nikki, et al. Anatomical 2d/3d shape -matching in virtual reality: A user interface for quantifying joint kinematics with radiographic imaging[C]// 2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces. [S.l.: s.n.], 2017.
计算机学院计算机科学与技术专业 190614 班学生刘兆薰
毕业设计（论文）时间： 2023 年 03 月 01 日至 2023 年 06 月 01 日
答辩时间： 2023 年 06 月 01 日成绩：
指导教师：
兼职教师或答疑教师（并指出所负责部分）：
系（教研室）主任（签字）：
注：任务书应该附在已完成的毕业设计（论文）的首页。
本人声明
我声明，本论文及其研究工作是由本人在导师指导下独立完成的，在完成论文时所利用的一切资料均已在参考文献中列出。
作者： 刘兆薰签字：
时间： 2023 年 05 月北京航空航天大学毕业设计（论文）第 I 页虚拟现实头眼协同对象操纵方法设计与实现学生： 刘兆薰指导教师： 王莉莉
摘要
本论文提出了一种在虚拟现实基于头眼协同的对象操作方法。该方法是凝视主导且完全无手干预的，实现了包括空间平移、旋转和等比例缩放的完全 6DOF 操作。我们还提出了一个完整的方法流程和一个基于 3D 用户界面的“四叶草”模式选择菜单，让用户只需用眼动信号即可轻松切换不同的操作模式，实现了在虚拟空间中对多对象的连续交互操作。为应对眼动追踪数据的高噪音问题，我们引入了过滤算法和线性优化过程来增强用户体验，确保交互自然流畅。这种新型交互系统使身体有障碍的人或手部被占用或限制的场中的物体操作变得更加容易。通过消除对手部的需求，这种方法为与虚拟现实环境的交互提供了一种新的方式，扩大了沉浸式体验的可用性。
关键词：人机交互，虚拟现实，三维对象操纵，头眼协同，无手操纵，多模态接口
北京航空航天大学毕业设计（论文）第 II 页

Abstract

This paper proposes a head-eye collaborative object manipulation in virtual reality. Our eye-dominant and hands-free method enables spatial translation, rotation, and proportional scaling with a complete 6DOF manipulation. We also realize an entire pipeline with a mode-switching 3D user interface menu called “Clover,” allowing users to effortlessly switch between different manipulation modes with sole eye movement. The pipeline enables sequential and incessant interaction actions with multiple objects in a virtual environment. To address the challenges posed by noisy eye-tracking data, we introduce a filtering algorithm and a linear optimization process to enhance the user experience, ensuring that the interaction is both natural and fluent. This novel interaction system makes object manipulation accessible to individuals with physical disabilities or in scenarios where hands are either occupied or restrained. By eliminating the need for hands, this approach provides a new way of interacting with virtual reality environments, expanding the usability of immersive experiences.

Key words: Human-computer Interaction, Virtual Reality, 3D Object Manipulation, Head-eye Collaboration, Hands-free Manipulation, Multimodal Interface

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 III 页

目录

1 绪论

1.1 课题来源

1.2 研究背景

1.3 研究意义

1.4 研究目标

1.5 论文结构

2 研究现状

2.1 基于手部（含手柄）的操纵

2.2 基于眼动的操纵

3 方法设计与实现

3.1 方法概述（Pipeline）

3.2 场景浏览与目标选择

3.2.1 场景浏览

3.2.2 目标选择	12
3.3 “四叶草”模式选择菜单	13
3.3.1 设计理念	13
3.3.2 菜单说明	14
3.4 对象操纵	14
3.4.1 空间位移	15
3.4.2 空间定轴旋转	16
3.4.3 空间等比例缩放	17
3.5 信号处理	17
3.5.1 眼动信号滤波算法	17
3.5.2 平滑交互处理	18
北京航空航天大学毕业设计（论文）第 IV 页	
4 实验设计	20
4.1 先导实验	20
4.1.1 实验 1：眼动确认信号筛选	20
4.1.2 实验 2：眼动操纵视线驻留检测优化	22
4.2 用户实验	23
4.2.1 实验 1：单物体位移对接实验	23
4.2.2 实验 2：多物体操纵“积木”实验	26
5 结论	30
5.1 结论与展望	30
5.2 方法局限性	30
5.3 后续工作	

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 1 页

1 绪论

1.1 课题来源

课题来源于北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室。

1.2 研究背景

虚拟现实（Virtual Reality）技术，简称 VR，是一种利用计算机技术来模拟生活环境或创造虚拟现实的新型多媒体技术，是扩展现实（Extended Reality）技术的一个分支。

目前主流的 VR 设备可利用头戴式显示器建立起一个完全虚拟的三维空间。使用者在这个虚拟的环境里进行交互操作时，计算机可以立即进行高度实时的、复杂的运算，将精确的三维影像传回，让使用者身处完全的沉浸式视觉环境中。该技术整合了计算机图形学、仿真模拟、人工智能以及并行计算等技术的最新发展成果，是一种融合多种先进技术的模拟系统。

1.3 研究意义

VR 已经在影视娱乐、教研教学、设计辅助等领域颇有建树，然而学界和工业界依旧留存着许多非常关键的问题亟待解决，拥有非常大的研究价值。

就目前而言，限制 VR 普及和发展的较为直接的阻碍，除开较高的市场售价，则来自于其仍旧较低的易用性，即虚拟环境中对物体的操控和交互的准确度依旧不容乐观，或是操作指令和交互动作过于复杂繁琐。这个缺陷直接降低了用户对 VR 技术的接受度和使用期望。因此，VR 中的对象操纵方法的优越性是提高其使用体验和普及度的基本问题之一。许多研究者已经进行了大量的研究，但仍有较大的提升空间。常规的对象操纵动作包括点击、按压、抓取、移动、释放等，其对应对象的直接具体表现主要为创建、

销毁、位移、形变、旋转和缩放。对象操纵的速度、准确性、学习成本、使用压力和多样性将直接影响应用程序的效果，而在虚拟环境中实现高效且易用的对象操纵具有一定的挑战性。因此，本研究拟针对虚拟现实中对对象操纵的关键问题进行研究，旨在提出相较于目前国际一流水准方法更加高效易用的基于头眼协同的虚拟现实对象操纵方法。

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 2 页

1.4 研究目标

本研究的主要探究问题是如何确定一套快速、准确、易用的虚拟现实头眼协同对象操纵方法。这个问题的主要难点包含：（1）通过眼动可获取的信号有限；（2）眼动信号不稳定，并且由于本能动作（如眨眼）干扰，眼动信号解析难度大；（3）眼动操纵使用负担非常大，现有方法操作流程复杂并且需要视线高度集中，容易产生眼球生理性疲劳。

基于此考虑，我们需要以尽可能少的头眼动作组合和尽可能小的专注度要求完成尽可能多样的对象操纵任务。因此，本研究的主要内容是：（1）头眼协同的场景与目标浏览；（2）头眼协同的目标选择；（3）头眼协同的对象操纵。大致研究步骤是：（1）确定针对操纵速度、准确度和使用负担的评估指标；（2）探索比较多种头眼协同交互方法；（3）

确定一套高效易用的基于头眼协同的虚拟现实对象操纵方法，支持操纵对象位移、旋转和缩放；（4）根据评估指标对比目前国际一流方法（baseline）并作结果分析。

1.5 论文结构

本论文由五个章节构建而成。

• 绪论：本章节陈述了该课题来源以及其研究背景与意义，阐释了本次研究的目标，并对论文框架结构作出了介绍；• 研究现状：本章节梳理了基于手部（含手柄）的和基于眼动的对象操纵方法的国内外研究现状以及有代表性的工作；• 方法设计与实现：本章节详细介绍了本文提出的基于头眼协同的对象操纵方法，包括方法流程、场景浏览与目标选择、“四叶草”模式选择菜单、对象操纵以及信号处理；• 实验设计：本章节详细介绍了本次研究所涉及的两个先导实验和两个用户实验以及它们的设计意图和理念；• 结论：本章节概括了本次研究的结论和贡献，同时总结了本方法的不足之处及后续可开展的工作。

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 3 页

2 研究现状

对象操纵是 VR 技术中最为基本且必要的交互行为之一。针对对象操纵这一特定的研究主题，扩展现实的所有门类，甚至传统计算机图形界面的研究成果皆可启发虚拟现实的更新和发展。在过去的二十年里，国内外许多相关领域学者致力于对象操纵的相关研究。根据已有的研究内容，扩展现实中的对象操纵方法主要由以下两大思想构成：（1）

基于手部（含手柄）动作；（2）基于眼动[1][2]。

2.1 基于手部（含手柄）的操纵

在基于手部（含手柄）追踪的方法研究早期，学界主要的三大思路为在虚拟环境中单手直接操纵、延长用户手臂和射线广播（ray-casting），见图2.1。虚拟延长手臂思路的代表研究来自于 Ivan Poupyrev 团队在 1996 年发表的 Go-Go 沉浸式交互方法[3]。

Go-Go

使用交互式增长用户手臂的元函数和非线性映射来指定和操纵远处的物体。与同时期的其他技术不同的是，Go-Go 允许对附近的和远处的物体进行无缝直接操纵。然而，Go-

Go 技术提出的物体选择和操控模式并不能完全作为一个完整的交互方法来供人们使用; Go-Go 应该被视为以同时期技术为基础的一个补充, 而不能完全取而代之。射线广播的思路和虚拟延长手臂类似; 射线广播的思路是将射线束从使用者的手中延伸出来, 从而指定操纵物体。然而, 射线广播思路存在比较明显的弊端。由于在射线广播的对象操纵中物体是被连接到射线末端的, 所以除了以射线本身为轴可以完成的动作, 许多操纵都是难以简单实现的, 因为只有一个自由度(围绕射线轴的旋转)可以用射线广播的方式独立控制。比如, 若用户希望以与射线方向垂直的轴向旋转一个物体, 单纯以射线广播是无法完成的。此外, 射线广播还缺乏一种控制物体与用户之间距离的方法, 导致用户

(a) PRISM (b) Go-Go (c) 射线广播图 2.1 研究早期三种主要的基于手部动作追踪的对象操纵方法北京航空航天大学毕业设计(论文)第4页

(a) 基于双手直接操纵的 Z 技术

(b) 基于双手直接操纵的 Sticky Tools 方法图 2.2 两种具代表性的基于双手动作的对象操纵方法无法准确地将物体拉近或推远, 而这也是对象操纵的基础功能之一。

当把 Go-Go 方法和射线广播以及其他方法(例如通过将虚拟手臂延伸到无限远来改进 Go-Go 的 Stretch Go-Go)进行比较时, 并没有明显的赢家[

4]。用户评估结果显示,

所有技术都有明显的缺点。在这次评估中, HOMER 方法被提出来了; 这是一种以手为中心的基于射线广播的对象操作技术[4]。HOMER 使用射线来选择物体, 在选择物体后,

它将虚拟的手移动到物体上; 用户的身体和手之间的当前距离被映射为到虚拟物体的距离。因此, HOMER 方法操纵对象的方式与 Go-Go 技术类似, 但缩放系数是针对每个选定的物体独立计算的。

到了 21 世纪, 学界将研究重心放在虚拟环境对象操纵的精确性上。一个具有代表性的方法是 Scott Frees 团队在 2005 年提出的 PRISM[

5], (见图2.1(a)) PRISM 是一种通

过缩放操作进行精确和快速交互的方法, 它在同时期是一种非常新颖且具有开创性的交互技术。PRISM 主动根据用户在虚拟环境中的行为特征来确定他们想要的操纵目标是明确还是不明确的。当操纵目标明确时, PRISM 动态地调整“控制/显示”比例来提高对象操纵的精确度。该比例决定了物理手部运动和受控虚拟物体运动之间的关系, 降低了传感器对手部运动监测不必要的灵敏度, 从而减少操作误差。使用 PRISM, 用户始终完全控制着被操纵物体的位置。与像 Go-Go 这样的技术相比, PRISM 在能力范围上也有很大提升, 最明显的进步在于 PRISM 扩大了手部运动的规模以允许“远距离”操纵, 同时在特定情形中可以主动缩小手部运动的幅度以提高精确度。

在这之后, Curtis Wilkes 等人将 PRISM 与 HOMER 相结合, 在 2008 年提出了融合了两种方法精华的 Scaled HOMER[6]。Scaled HOMER 使用基于速度的缩放, 允许用户北京航空航天大学毕业设计(论文)第5页

(a) Houde 团队的方法 (b) Conner 团队的方法图 2.3 两种具代表性的基于外加虚拟控制柄的对象操纵方法在近距离和远距离进行更为精确的操作。它比原始的 HOMER 在各种任务条件下, 尤其是有关需要高度精确、远距离放置物体或大运动距离的任务中的性能都有所提高。2015

年, 在 Go-Go 和 PRISM 研究之后, Chris Auteri 等人将这两种技术结合起来, 以提高延伸的三维操作的精确性[

7]。该方法首先将 PRISM 直接应用于用户的手(基础光标)的运动,

从而基于运动速度计算出一个新的光标位置(PRISM 光标)。然后, PRISM 光标移

动的距离被基于 Go-Go 距离的启发式方法所放大。与 PRISM 和 HOMER 的结合一样, Go-Go 和 PRISM 的结合提供了一些改进, 尤其是在任务完成的成功率和精细度上。

基于双手的操纵在 2008 年被 Noritaka Osawa 团队提出[

8]。该团队提出了一种用于

在沉浸式虚拟环境中精确定位 3D 虚拟物体的单手和双手控制技术。这个方法提出了一

种位置调整策略, 包括一个类似于 PRISM 的用于减缓手部运动的比例系数以及一个被动的视角调整。该交互系统会自动将视角接近抓取点, 使被操纵的物体看起来更大, 从而更易于操控。为了有效控制这些调整, 该团队提出了两种技术。第一种是基于单手操纵的; 因为当用户想精确地操纵一个物体时, 他们的手会慢慢移动, 所以通过对单手的速度监测, 系统可以判断当前对象是否需要精确操纵。另一种是基于两手间距离的; 当用户两手之间的距离很小时, 调整就会被激活。通过用户评估, 位置和视点的调整比禁

用这种调整有更好的操纵效率和用户体验。此外, 该团队的测试结果还显示, 双手控

制比单手表现更好。承接双手直接操纵的方法, Martinet 团队提出了两种移动 3D 对象的技术[

9]。第一种扩展了许多 CAD (Computer-aided Design, 计算机辅助设计) 应用程

序中的视窗概念; 它引入了四个视窗, 每个视窗显示 3D 对象的不同视图。在其中一个北京航空航天大学毕业设计(论文)第6页

(a) LTouchIt (b) 多点触控方法图 2.4 两种基于手部动作(含手柄)追踪的非直接对象操纵方法视窗中触摸并拖动物体, 可以在与该视窗平行的平面上平移物体。第二种方法被称为 Z

技术; Z 技术只使用场景的一个视图(见图2.2(a))。在这种技术中, 第一次触摸触发在平行于视图的平面上移动物体, 第二次触摸触发垂直于视图平面的前后运动。Martinet

的初步评估表明, 用户更喜欢 Z 技术。Martinet 等人在 Z 技术的基础上进行了改进, 推出了 DS3, 一种基于 DOF 分离的三维对象操纵技术[

10]。与 Z 技术类似, 一次直接接触

可以在屏幕平面上移动物体, 间接触摸可以操纵物体深度, 两次直接接触可以实现旋转。Martinet 将 DS3 与之前的类似方法, 比如 Hancock 团队提出的 Sticky Tools 方法(见

图2.2(b)) 和 Reisman 团队提出的 Screen-Space 方法进行了比较, 结果显示 DOF 分离导

致了更好的结果[

11][12]。

另外一种值得一提的基于手部动作追踪的方法是外加虚拟控制柄（见图2.3）；虽然这类方法暂未被应用到虚拟环境中，但是它们对于对象操纵的研究是颇具启发的。

Houde 团队在 1992 年开发了一种基于“操纵盒”的方法；这种方法由一个围绕着物体的边界长方体框组成，拖动长方体即拖动物体，另外还有三个旋转柄用于围绕其中心轴旋转物体[

13]。Conner 团队也采用了设置虚拟控制柄来进行对象操纵；他们的方法允许

完整的 9-DOF（Degree of Freedom，自由度）控制（平移、旋转和缩放）甚至诸如扭曲的其他变形[

14]。该方法的虚拟控制柄的两端有一个小球体，它们将几何变换约束在一个

平面或轴上；用户拖动其中一个球体可以平移、旋转或缩放物体。秉承着这两个方法的思想，Mendes 团队在 2016 年提出了相似的一个基于外加虚拟控制柄的方法。他们从实

验结果中提出了一套发展准则：（1）直接操作很适合粗略的变换；（2）位移和旋转操作

应尽可能分离，以防止不需要的变换；（3）单一的 DOF 分离对于精确的变换是非常理想的，通常用于细粒度的调整。

2010 年以后，基于手部动作（含手柄）追踪的非直接对象操纵方法开始出现。其中北京航空航天大学毕业设计（论文）第 7 页图 2.5 目前基于手部动作（含手柄）的对象操纵最优方法：PinNPivot

较有代表性的两个方法为 Mendes 团队在 2011 年提出的 LTouchIt 和 Kin-Chung Au 团队在 2012 年提出的多点触摸方法（见图2.4）。LTouchIt 虽然使用了直接操纵平移的方法，但在 DOF 分离之后，它可以控制物体在不超过两个维度上的位置，并使用旋转手柄一

次围绕一个轴进行旋转；用户可以选择一个手柄来定义一个旋转轴，并通过另一只手的操作来指定旋转角度[

15]。Au 团队利用多点触摸表面的高输入带宽，将标准变换部件的

操作能力委托给多点触摸手势。这使得使用单一的多点触控动作就能对约束和变换操作进行无缝控制。用户可以用两个触摸点选择一个候选轴，通过按住并移动两个手指来进行物体的变换[

16]。

目前，基于手部动作（含手柄）的追踪的对象操纵方法的 SOTA（state-of-the-art，最先进方法）为 Gloumeau 团队在 2020 年提出的 PinNPivot 方法[

17]。这个方法使用“销钉

（pin）”来约束 1DOF/2DOF/3DOF 旋转；PinNPivot 还支持 6DOF 操纵和 3DOF 平移，具体的一个操作流程可参考图 2.5。在该团队与以往技术的比较表明，PinNPivot 拥有更准确和更快的操纵效率。

2.2 基于眼动的操纵

在 2015 年以后，眼球追踪在头戴式虚拟现实显示器中的应用越来越多，各种集成了眼球追踪器的头盔已经在市场上销售。根据 Adhanom 团队在 2023 年发表的研究，眼动跟踪在虚拟现实中的应用是高度多样化的，并且跨越了多个学科[

18]。因此，近年来基

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 8 页于眼动追踪的对象操纵方法应运兴起。

在 VR 中实现基于眼睛注视的指向的最常见方法是使用眼动仪提供的 3D 注视方向向量，并观察场景中的哪些对象与方向向量相交[

19]。通常，射线是基于方向向量投射的，

并且射线相交的第一个物体被认为是被指向的项目（见图2.6）。这与射线广播的基本思想是一致的。各种研究表明，基于凝视的指向比基于手的指向更快，因为我们能够比我们的手更快地将目光移向目标[

20]。然而，由于眼球运动的固有生理特性和眼动追踪的

技术限制，与其他常见的指点界面相比，基于眼睛注视的准确度还是稍显逊色的[

21][22]。

基于眼睛注视的指向界面中的不准确性主要有两种形式，一是由眼睛跟踪数据中的自然噪声引起的，二是由眼睛跟踪数据质量不稳定引起的。

基于眼动追踪的操纵方法的一大难点是目标对象选择。仅通过眼睛注视进行选择是

一项相对具有挑战性的任务，需要实施更为精密的机制以在虚拟环境中使用基于眼睛的交互。根据以往的方法，我们可以实施其他选择确认技术来辅助眼动交互。这样做的一

个额外好处是可以解决人机交互领域经典的“点石成金”问题，即“无论你看哪里，都有东西被激活；你不能在没有发出命令的情况下看任何地方”[

23][24]。

目前已有许多学者使用各种技术来实现虚拟环境中基于注视的交互选择确认。Hansen

团队在 2018 年提出了一种基于眼睛注视的停留进行选择确认的技术[

21]。Sidenmark 和

Gellersen 在 2019 年实施了两种头部辅助的眼动交互技术，第一种是 Eye & Head Dwell，第二种是 Eye & Head Convergence[

19]。Eye & Head Dwell 是一种停留以确认的技术，其

中停留计时器仅由头部支持的凝视转移触发，但可以通过仅眼睛凝视暂停和恢复；Eye

& Head Convergence 是一种用于快速目标确认的替代技术，它允许用户通过将眼睛指示器和头部指示器对准目标来确认选择。Kumar 和 Sharma 团队在 2016 年提出了一种使用眨眼进行选择确认的技术[

25]。Pfeuffer 团队在 2017 年提出了一种手眼协统的选择确

图 2.6 基于眼睛注视的指向选择北京航空航天大学毕业设计（论文）第 9 页图 2.7 一个基于眼动和正交平面的对象操纵方法：OrthoGaze

认方法；这个方法允许用户用眼睛注视物体并同时加以一种“捏合”手势来辅助确认选择[

26]。Pai 团队在 2019 年提出了另外一种协同辅助操纵技术；用户可以用目光指向目标，并使用肌电图检测到的手臂肌肉收缩来触发操纵动作[

27]。Qian 和 Teather 团队在 2017 年提出了一种通过键盘按钮按下进行选择确认辅助，并使用眼睛注视进行指向选择的方法[

28]。最近，Sidenmark 团队在 2020 年提出了 Outline Pursuits 方法，它利用平滑追踪来允许用户在虚拟环境中选择被遮挡的对象[

29]。

伴随选择技术而来的另外一个值得关注的问题是反馈技术。一个完整的虚拟环境中的对象操纵技术应该向用户提供反馈，让用户能够清楚地了解系统的状态[

30]。由于眼睛对视野中的视觉变化很敏感，它们会本能地尝试将注意力转移到这些视觉变化上。因此，在向用户提供反馈时应该格外小心，因为视觉上突出的反馈机制可能会产生意想不到的后果，即转移用户的视线以产生不期望的交互动作。Boyer 团队在 2017 年提出的一种非视觉反馈方法，他们使用听觉反馈来避免不必要的视线转移[

31]。然而，学界依然有很多基于视觉的反馈方法：Blattgerste 团队在 2018 年提出了一种突出显示所选对象的反馈方法；Mohan 团队也在 2018 年提出了一种在所选对象周围显示确认标志的方法；Sidenmark 团队在 2020 年提出了一种在所选对象周围显示轮廓的反馈方法[

32][33][29]。

根据目前基于眼动追踪的对象操纵方法的研究数量，眼动追踪将很快成为 HMD 系统不可或缺的一部分。因此，我们预计围绕 HMD 眼动追踪的研究和开发将在未来几年加速和扩展。然而，目前大部分眼动追踪方法依旧存在许多值得优化的问题。除了硬件限制，交互动作所带来的生理性不适也需要得到改善。大多数基于眼动追踪的操纵方法都包含眨眼命令（包括眨眼、双眼眨眼和眨眼眼球运动）[

25]。要求用户改变他们的自然眨眼频率可能会导致用户眼睛疲劳、眼睛干涩和眼睛疲劳[

34]。Kumar 和 Sharma 团队在 2016 年的研究结果也表明，频繁眨眼和眨眼会导致用户眼睛疲劳[

25]。

2. 虚拟现实头眼协同对象操纵方法设计与实现_第2部分			总字数：9867
相似文献列表			
去除本人文献复制比：0.5%(50) 去除引用文献复制比：0.5%(50) 文字复制比：0.5%(50) 疑似剽窃观点：(0)			
1	基于融合传感的纱线瑕疵检测系统的研究	0.5% (50)	
程银宗(导师：叶轻舟) - 《福建工程学院硕士论文》 - 2021-05-01			是否引证：否
原文内容			

而且，基于眨眼

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 10 页图 2.8 目前涵盖凝视的物体操纵最优方法的界面往往不准确，因为下意识的眨眼很难与自然眨眼区分开来，所以系统往往需要用户做出完全下意识的眨眼动作，如快速多次眨眼。然而，长时间眨眼有明显的缺点，例如减慢交互流程并在长时间眨眼期间阻挡用户的视线。因此，基于眼睛注视的系统控制需要在交互动作上做出合理的优化。

目前基于头眼协同的最优方法是 Liu 团队在 2020 年提出的 OrthoGaze，它允许用户只需用眼睛凝视就能直观地操纵虚拟物体的三维位置（见图2.7）[

35]。该方法利用了三

个可选择的正交平面，其中每个平面不仅有助于引导用户在任意虚拟空间中的注视，而且还允许对物体位置进行 2DOF 操作，是一种完全不依赖手部的对象操纵方法。然而，这个方法仅实现了空间位移，而没有考虑旋转和缩放，所以并不能被视为一个完整的操纵方法。

目前涵盖眼动追踪的对象操纵方法的最优方法为 Yu 团队在 2021 年提出的一种基于凝视和手部动作的三维物体操纵方法 Implicit Gaze[

36]。该方法的整个操纵任务可以分

解为四个阶段：指示、确认、操作和释放（见图2.8）。该研究表明，当所有目标都位于用户前方且在手臂可触及的距离内时，基于凝视的交互对于物体操作没有明显的性能优势；但对于有远处物体的较大空间，凝视输入可以减轻手臂的疲劳问题。眼动和其他模态的不同整合、协调和过渡策略可以为构建更高效的物体操纵技术提供优势。然而，这个方法依旧依靠手部动作，并不能被视为一个完全无手（hands-free）的操纵方法。

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 11 页

3 方法设计与实现

3.1 方法概述（Pipeline）

该对象操纵交互系统的方法流程可以用一个有限状态机来表示，见图3.1。

场景浏览与目标选择：对应状态 IDLE。在进行目标选择时，用户先以通过头部向前射线指向目标操纵对象，之后以快速两次眨眼作为确认信号选择该对象，该选择和确认方法的优势由 Yuan Yuan Qian 团队在 2017 年作过探讨[

37]。接收到选择确认信号后，进

入下一状态；操纵模式选择：对应状态 OBJECT_SELECTED。生成一个“四叶草”模式选择菜单，用户可以通过凝视某一选项以进入对应的操纵模式，用户也可以通过凝视“返回”选项以退回到 1（详见章节3.3）；

对象操纵：对应状态 OBJECT_MOVING、OBJECT_ROTATING 或 OBJECT_RESCAL-

ING。我们提出的操纵系统支持六自由度（6DOF）操纵。在不同的对象操纵模式下，用户可以对物体进行三自由度位移、二自由度旋转和一自由度缩放（详见章节3.4）；图 3.1 交互系统有限状态机北京航空航天大学毕业设计（论文）第 12 页

确认操纵结果：对应状态转移条件“操纵确认信号”。通过快速两次眨眼作为确认信号以确认当前操纵状态，回到 OBJECT_SELECTED。

3.2 场景浏览与目标选择

该交互系统的浏览和选择方法不需要使用复杂的手柄或其他输入设备，使得用户能够更加自然地与虚拟环境进行交互。

3.2.1 场景浏览

在场景浏览时，该系统通过跟踪用户的头部向前（forward）射线控制场景中虚拟摄像头的移动，将其实时拍摄的场景画面即时反馈到用户的头戴式显示器中，以提供一个自然、直观的场景浏览体验。

其次，我们需要计算实时视点。视点的计算涉及到两个方面：视角和视位。视角是指用户在虚拟环境中的观察方向，通常由头部的旋转角度决定。视位是指用户在虚拟环境中的位置，通常由身体的移动或手柄的操作决定。为了实时地获取用户的视角和视位，需要使用一些传感器或追踪器，例如红外摄像头等。这些设备可以测量用户头部或身体的运动数据，并将其传输给计算机。根据用户的视角和视位，我们可以获取用户当前所期望观察、选中以及操作的物体。

在判断驻留点时，我们使用射线广播（ray-casting）的方法。射线广播是一种在虚拟现实中选择对象的常用技术；在我们的交互系统中，它利用用户的头部向前方向来发射一条射线，与场景中的对象进行碰撞检测，从而获取驻留点。射线广播的优点是简单、直观、高效、学习成本低并且不容易产生眩晕感和迷惑感。当驻留点在某个物体上时，该物体将被高亮，以消除对象选择时的歧义。同时，系统会在用户界面上与头部向前射线相交处生成一个瞄准点，帮助用户瞄准目标对象；该瞄准点仅会在 IDLE 状态下生成。

当目标对象被瞄准后，用户可以通过快速两次眨眼来确认选择。

3.2.2 目标选择

在 IDLE 状态下，用户可以使用眼动确认信号来选择目标。该部分的主要挑战包括如何准确地捕捉并且解析用户的眼动数据以及如何提供合适的反馈和提示。

最为常见且自然的主动眼动信号有单眼眨眼和快速两次眨眼，因此我们将这两种眼

动行为作为我们的最终眼动信号候选池。我们设计了一个前导实验（Pilot Study），目的

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 13 页图 3.2 “四叶草”模式选择菜单以及选择确认进度盘是从这两种眼动信号中，确定一个最为高效并且带来最小使用压力的眼动确认信号，这

将在之后的实验设计章节中作更细致的介绍。通过加权分析两种眼动行为的实验结果，

我们最终确定使用快速两次眨眼来作为我们的目标选择以及确认信号。

在选择确认后，系统的状态转移到 OBJECT_SELECTED，并且会提供给用户一个

基于听觉的声音反馈信号。这个反馈信号相对于视觉是异模态的，目的是提高交互系统的可靠性以及降低用户的迷惑感。

3.3 “四叶草”模式选择菜单

3.3.1 设计理念

我们在交互系统设计阶段考虑到大多数实际的完整操纵流程往往不仅包含一个特定操纵模式的选择，还会包含多种操纵模式之间的切换。然而，当前的基于凝视和眼动的交互方法并没有考虑便捷的模式切换；在这些方法中，如果用户需要在一次操纵结束后切换到下一种操纵模式，则需要退回到最初态重新进行一遍从选择到操纵到流程，引入大量冗余操纵和效率浪费。所以基于此考虑，我们设计了一个“四叶草”模式选择菜单。

我们希望“四叶草”模式选择菜单可以让用户简便地用凝视动作来选择进入或者切换到某种交互状态。

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 14 页

3.3.2 菜单说明

“四叶草”模式选择菜单在且仅在系统有限状态机的 OBJECT_SELECTED 状态下生成在用户界面上，用户可以通过它来选择进入到某具体的交互模式：空间位移、空间

旋转和空间等比例缩放，分别对应系统有限状态机中的 OBJECT_MOVING、OBJECT -

ROTATING 和 OBJECT_RESCALING 三个状态；用户也可以通过它来取消选中物体以回到 IDLE 态。这个过程可以在我们规定的系统有限状态机中体现，见图3.1。

菜单在四个方向提供了四个的选项，分别为位移、旋转、缩放和取消；用户可以通过看向相应的方向来选择对应的选项。在规定每个方位具体对应哪个选项时，我们首先设置了一个问卷调查，发放给 30 个随机人员采样以获取用户根据推测对四个选项使用频率的排序；其次，我们参考 Maxwell 等人在 2006 年发表的结论（眼球水平运动的负担比垂直运动的负担小[

38]），将问卷调查中显示最频繁使用的两种交互模式选项（位移、

旋转）设置在左右两侧，将剩下的两种选项（等比缩放、取消）设置在上下两侧。

为了避免误触和“点石成金”的人机交互领域经典问题[

24]，我们规定了一个选择确

认时间；该时间默认为 1 秒，用户也可以根据自己的习惯调整时长。当用户选择时，界面上会显示一个选择确认进度盘

(见图3.2)，此时开始选择确认倒计时；进度盘会随着用户凝视射线持续指向选项而逐渐变满，用户可以在进度盘进度未满足之前通过使视线复位来取消选择。当选择确认倒计时结束时，进度盘进度满，用户立即转移至凝视射线指向选项的对应状态。

3.4 对象操纵

我们的交互系统支持完全 6DOF 的对象操纵，允许用户对目标对象进行空间位移、空间旋转、等比例缩放三种具体的操纵，分别对应系统有限状态机中的 OBJECT_TRANSLATING、OBJECT_ROTATING 和 OBJECT_RESCALING。

在每种对象操纵模式下，我们尽量采取线性映射的策略，并且引入一种特殊的信号

增强函数：

$$A(v) = 5v^5, -1 \leq v \leq 1 \quad (3.1)$$

让用户在小幅度动作时可以对对象进行微调，在大幅度动作时可以让对象作快速动作；其增强效果见图3.3。

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 15 页图 3.3 信号增强函数为了减小操作负担和学习难度，我们都尽可能采用眼动进行主导的操纵，并且尽量不引入更多的操纵模态。为了便于接下来对具体操纵方法的阐释，我们在对象操纵空间中设置了一个三维直角坐标系，见图3.4。

3.4.1 空间位移

在空间位移时，对于 X-Y 平面的移动，对象跟随眼动向前射线在 X-Y 平面的投影距离作出相应的动作；假设眼动向前射线在 X-Y 平面的投影坐标为 (x, y) ，对象在 X 轴向和 Y 轴向的移动为：

$$\begin{aligned} \delta x = & \\ 0, & \text{ if } |x| < T \\ x \cdot C, & \text{ default } \quad (3.2) \\ \delta y = & \\ 0, & \text{ if } |y| < T \\ y \cdot C, & \text{ default } \quad (3.3) \end{aligned}$$

其中 T 和 C 分别是预先规定的阈值和比例系数。对于 Z 轴方向的移动，对象跟随头部以 Z 轴为旋转轴的角度-距离映射作出相应的动作；假设头动绕 Z 轴的旋转角度为 ω ，对象在 Z 轴方向的移动为：

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 16 页 $\delta z =$

$$\begin{aligned} 0, & \text{ if } |\omega| < T \\ \pi \cdot 180 & \\ \cdot \omega \cdot C, & \text{ default } \quad (3.4) \end{aligned}$$

其中 T 和 C 分别是预先规定的阈值和比例系数。

3.4.2 空间定轴旋转

在空间旋转时，对于以 X 轴的旋转，对象跟随眼动向前射线在 Y 轴的投影距离-角度映射作出相应的动作；对于以 Y 轴的旋转，对象跟随眼动向前射线在 X 轴的投影距离-角度映射作出相应的动作；假设眼动向前射线在 X-Y 平面的投影坐标为 (x, y) ，对象在绕 X 轴向和 Y 轴向的旋转为：

$$\begin{aligned} \delta y = & \\ 0, & \text{ if } |y| < T \cdot 180 \\ \pi & \\ \cdot x \cdot C, & \text{ default } \quad (3.5) \\ \delta x = & \\ 0, & \text{ if } |x| < T \cdot 180 \\ \pi & \\ \cdot y \cdot C, & \text{ default } \quad (3.6) \end{aligned}$$

其中 T 和 C 分别是预先规定的阈值和比例系数。

图 3.4 操纵空间坐标系北京航空航天大学毕业设计（论文）第 17 页

3.4.3 空间等比例缩放

在空间缩放时，对象跟随眼动向前射线在 X 轴的投影距离-缩放系数映射作出相应的动作；假设眼动向前射线在 X 轴的投影坐标为 $(x, 0)$ ，对象的缩放系数 K 被计算为：

$$\begin{aligned} K = & \\ 0, & \text{ if } |y| < T \text{ or } x \leq -1 \\ 2, & \text{ if } xC \geq 1 \\ 1 + xC, & \text{ default } \quad (3.7) \end{aligned}$$

其中 T 和 C 分别是预先规定的阈值和比例系数。基于此缩放系数，对象放缩的最终具体表现为 $S_{cale}' = S_{cale} \cdot K$ 。

3.5 信号处理

3.5.1 眼动信号滤波算法

基于眼动的对象操纵方法的一大难点即眼动信号不稳定。其原因为：（1）眼部肌肉本能动作（如眨眼、跳视等）干扰频繁，引入大幅度的离群噪声信号，导致眼动信号解析难度大；（2）目前的眼动追踪设备信号无法做到采样率和分辨率的平衡，导致设备无

法兼顾运算速度和捕捉精度，并且时常会出现随机的脉冲干扰。所以，我们为此提出了

一种针对该交互系统的眼动信号滤波算法，让追踪设备可以在最低硬件消耗的基础上做到低噪声、平滑的眼动信号捕捉，见算法1。

该滤波算法基于中位值平均滤波法。中位值平均滤波算法是一种常用的数字信号处理方法，它结合了中位值滤波和算术平

均滤波的优点，能有效地抑制脉冲噪声和周期性干扰，提高信号的平滑度和稳定性。中位值平均滤波算法的基本思想是：对于给定的一

组采样数据，先去掉其中的最大值和最小值，然后对剩余的数据求算术平均值，作为该组数据的滤波输出。中位值平均滤波算法的优点有以下几个方面：（1）它能有效地消除由偶然出现的脉冲性干扰所引起的采样值偏差，保证了信号的真实性；（2）它对周期性干扰有良好的抑制作用，能够保留信号的基本特征；（3）它具有较高的平滑度，适用于高频振荡的系统；（4）该算法不需要排序，计算成本较低且反馈速度较快。

对于交互系统的某一时刻 n ，我们对其前 S AMPLE 帧接收的眼动信号采用中位值平均滤波算法，并将其返回值作为第 $n + 1$ 帧接收的眼动信号。

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 18 页

算法 1 针对该交互系统的眼动信号滤波算法

Input

dataBuffer: 一个储存至多前五帧眼动信号数据的列表。

Output

signal: 当前帧接收的眼动数据。

1: SAMPLE \leftarrow 5

2: currentBufferSize \leftarrow dataBuffer.Count()

3: if currentBufferSize < SAMPLE then

4: for i in Range(SAMPLE - currentBufferSize) do

5: dataBuffer.Enqueue(GetData())

6: Delay()

7: end for

8: else

9: dataBuffer.Dequeue()

10: dataBuffer.Enqueue(GetData())

11: Delay()

12: end if

13:

14: max \leftarrow -INF

15: min \leftarrow INF

16: for value in dataBuffer do

17: max \leftarrow value if value > max else max

18: min \leftarrow value if value < min else min

19: end for

20: dataBuffer.RemoveFirst(max)

21: dataBuffer.RemoveFirst(min)

22: sum \leftarrow 0

23: for value in dataBuffer do

24: sum \leftarrow sum + value

25: end for

26: signal \leftarrow sum / (SAMPLE - 2)

27: return signal

3.5.2 平滑交互处理

在目标选择以及操纵时，单纯依靠眼动或者头动的某一单一信号是不理想的；完全独立眼动和头动信号会使得交互流程不够自然，且很难实现微小幅度的交互动作，无法避免地会引入不必要的使用负担。因此，我们引入了一种头眼协同的信号处理函数，为交互过程引入更小的负担，使交互流程更加平滑。

平滑交互处理的核心思想即优化对凝视驻留点的计算方式。我们规定在 t_0 时刻的北京航空航天大学毕业设计（论文）第 19 页眼动操纵注视停留 OE 被计算为在时间段 n 内的眼动向前射线和头动向前射线的配合角

度偏移：

$OE_{t_0} = 1$

n

t_0

$t = t_0 - n$

$\hat{eye} \cdot \hat{head}$

$t = \hat{eye}$

$t = 1 \cdot \hat{head} t - 1$ (3.8)

其中， \hat{eye} 是视线的单位向量， \hat{head} 是头部注视的单位向量， \cdot 是向量内积运算符。

如果 OE 小于某一阈值，则表示用户正在尝试注视。我们的一个先导实验表明，这个优化是必要的；它可以让交互流程更加平滑自然，引入更小的使用负担。

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 20 页

4 实验设计

我们针对本次研究设计了两个先导实验和两个用户实验。先导实验部分的主要目的

是进行眼动确认信号的筛选和眼动操纵视线驻留检测优化方法的必要性探究；用户实验部分则是为了测试该对象操纵方法在单物体位移对接实验和多物体操纵“积木”实验中的效果。在实验过程中，我们会合理采集参试者的个人及实验数据，进行统计分析，并且从多客观度量和多主观度量对该对象操纵方法进行评估。我们的所有实验都基于表4.1的环境条件：

表 4.1 实验环境条件
类别项目规格VR 硬件设备头戴式显示器 Vive Focus 3
眼动追踪设备 Vive Focus 3 Eye Tracker
PC 配置
操作系统 Windows 11
GPU NVIDIA GeForce GTX 3060
CPU 3.6GHz Intel (R) Core (TM) i7-9900KF
RAM 16GB
软件版本
Unity 编辑器版本 2021.3.16f1
Vive Business Streaming 1.10.11
SteamVR 1.24.7
参试者姿态固定坐姿

4.1 先导实验

4.1.1 实验 1：眼动确认信号筛选

实验设计与流程

此先导实验的目的是从最为常见且自然的两种主动眼动信号（单眼眨眼和快速两次眨眼）中确定一个最为高效并且带来最小使用压力的眼动确认信号。

我们招募了 6 名参试者；为了保证多样性，我们尽可能保证男女比例相当。参试者北京航空航天大学毕业设计（论文）第 21 页在开始实验前需填写一个个人信息调查问卷，以询问性别、工作机构、年龄和能否自然地完成单眼眨眼的动作等。我们的此次实验组由 3 名男性和 3 名女性构成，其中有 3 人无法自然地完成单眼眨眼的动作。

每名参试者将使用不同的两个眼动确认信号分两次完成同样的一个任务。该任务内容是，在虚拟环境中会依次在随机时刻和随机位置出现 20 个小球，参试者需要使用当次实验规定的眼动信号（单眼眨眼或快速两次眨眼）选择以消灭它们。为了保证每次实

验结果的可比较性，我们规定：每个小球只有在参与者瞄准并且发出确认信号后才能消

灭；下一个小球只有在当前小球被消灭后才生成；在每次发出确认信号前，参与者必须按下一次键盘上的空格键，以记录实际的信号尝试次数。

在实验完成后，每名参试者将分别针对两种确认信号完成一个 NASA-TLX 任务负担表。

实验度量

我们将针对以下三个客观度量评估实验结果：

• 任务完成时间（毫秒）；• 任务负担（NASA-TLX 分数）；• 信号反馈精确系数（Feedback Accuracy Index, FAI）。我们规定在一次实验中，参

试者实际消灭的小球数量为 N，总共发出的信号尝试次数为 M；则有 FAI 的计算规则：

$$FAI =$$

$$\frac{N}{M}$$

$$(4.1)$$

表 4.2 先导实验 1：眼动确认信号筛选 - 实验结果

参试者	单眼眨眼	快速两次眨眼	完成时间 (ms)	NASA-TLX	FAI	完成时间 (ms)	NASA-TLX	FAI
1 (N)	187621	92	0.43	105832	71	0.79		
2 (Y)	80122	71	0.87	113475	68	0.88		
3 (N)	161298	83	0.39	92103	79	0.91		
4 (Y)	89172	62	0.91	125764	73	0.76		
5 (Y)	90817	77	0.81	109675	91	0.86		
6 (N)	80012	89	0.49	98122	80	0.83		

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 22 页

本次先导实验的实验结果汇报见表4.2；其中，参试者编号后会标注该参试者能否自然地完成单眼眨眼动作（“Y”代表能，“N”代表否）。

我们采用曼-惠特尼 U 检验（Mann-Whitney U Test）来分析数据的显著差异性；该检验假设两个样本分别来自除了总体均值意外完全相同的两个总体，目的是检验这两个总体的均值是否有显著的差异。对于任务完成时间，检验结果是 $U = 18$, $p < 0.05$ ；对于任务负担，检验结果是 $U = 42$, $p < 0.05$ ；对于 FAI，检验结果是 $U = 15.5$, $p < 0.05$ 。可以发现，三组结果皆存在显著差异；而快速两次眨眼均值表现更为理想，故可以确定快速两次眨眼显著优于单眼眨眼。

4.1.2 实验 2：眼动操纵视线驻留检测优化

实验设计与流程

此先导实验的目的是是否有必要引入眼动操纵注视停留检测的优化。

此次实验的实验组和先导实验 1（详见4.1.1）一致。每名参试者将分两次完成同样的一个任务；在两次实验中，我们会随机在某一次引入优化以消除主观的心理作用干扰。该任务内容和先导实验 1 一致；我们规定在此次先导实验中，两次任务都

使用快速两次眨眼作为确认信号。

在实验完成后，每名参试者将分别针对两次任务完成一个 NASA-TLX 任务负担表；由于用户在实验过程中并不知情某次任务是否引入优化，所以我们可以认为结果是客观的。

表 4.3 先导实验 2：眼动操纵视线驻留检测优化 - 实验结果

参试者引入优化组别			
(参试者不可见)			
含优化不含优化NASA-TLX NASA-TLX			
1	1	73	80
2	2	47	53
3	1	68	62
4	2	75	83
5	2	70	79
6	1	82	86

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 23 页实验度量

我们将针对任务负担评估实验结果。

本次先导实验的实验结果汇报见表4.3。

我们同样采用曼-惠特尼 U 检验来分析数据的显著差异性。对于任务负担，检验结果是 $U = 32, p < 0.05$ 。可以发现，两组结果存在显著差异，且引入优化组别和 NASA-TLX 结果不存在明显的相关性；而引入优化的任务负担均值表现更为理想，故此可以确定引入优化是必要的。

4.2 用户实验

为了消除偶然性、保证多样性，我们招募了 14 名参试者，并且尽可能确保男女比例相当。参试者在开始实验前需填写一个个人信息调查问卷，以询问性别、年龄、VR 使用经验等。问卷结果显示，实验的受试组由 8 名男性和 6 名女性组成，年龄分布在 20 到 38 岁；其中有 4 人未曾有过 VR 使用经验，6 人曾接触过 VR 使用，4 人对 VR 使用非常熟悉。

4.2.1 实验 1：单物体位移对接实验

实验设计我们将目前同样基于头眼协同的最优方法 OrthoGaze 中作为一个对照方法（CC）和基准线（baseline），并且复用其中的一个物体位移用户实验[35]。该用户实验设计为：参试者位于起始位置 $(0, 1[m], 0)$ 处，并尝试将大小为 $0.5[m] \times 0.5[m] \times 0.5[m]$ 的白色立方体从固定的起始位置 $(-1[m], 0.5[m], 5.5[m])$ 移动到多个目标位置，如图4.1(a)所示。

(a) 位移空间 (b) 场景实例图 4.1 用户实验 1：单物体位移对接实验北京航空航天大学毕业设计（论文）第 24 页在每次实验中，在目标位置上将出现一个半透明的、与白色立方体大小相同的绿色立方体；参试者必须将白色立方体与绿色立方体对齐，如图4.1(b)所示。目标位置总是位于一个具有 $2N[m]$ 边长的立方体空间的角落，其中心与白色立方体的初始位置中心重合。我们使用了 8 个不同大小的立方体空间，其中 $N \in \{0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4\}$ 。

指 标	
疑似剽窃文字表述	
1. 算法的基本思想是：对于给定的一组采样数据，先去掉其中的最大值和最小值，然后对剩余的数据求算术平均	
3. 虚拟现实头眼协同对象操纵方法设计与实现_第3部分	总字数：8886
相似文献列表	
去除本人文献复制比：0%(0) 去除引用文献复制比：0%(0) 文字复制比：0%(0) 疑似剽窃观点：(0)	
原文内容	

为了保持立方体对接的数量合理，该立方体空间的每个偏移方向都将被选择两次，并与每次出现的不同距离配对，从而确保每个偏移距离和方向在实验期间出现两次；这样，实验期间总共产生 16 个不同的目标位置。由于完全对齐白色和绿色立方体很困难，所以如果在用户确认放置时两个立方体之间距离小于阈值距离 $0.2[m]$ ，则认为对接成功。作为额外提示，当两个立方体在阈值距离内时，我们将目标立方体从半透明绿色变为红色。

为了在一个试验中成功，参试者不仅需要立方体移动到目标位置，还需要确认放置立方体。如果试验成功，参试者将收到一个声音反馈来确认。

实验流程在开始实验之前，参试者将进行 10 次对接以练习该交互方法。在正式实验开始后，每一组任务从白色立方体和目标位置出现在参与者面前开始，并在对接成功后结束；如果参试者在 20 秒内没有对齐立方体，则本次任务将被视为失败。

在全部任务完成后，用户需要完成 3 个主观调查问卷：SSQ (Simulator Sickness Questionnaire) 晕动症状问卷、SUS (System Usability Scale) 可用性调查问卷和 NASA-TLX (NASA Task Load Index) 任务负荷问卷。

实验度量

我们将从三个主观度量和三个客观度量来评估每一个参试者的实验结果。主观度

量：眩晕感 (SSQ)、可用性 (SUS)、任务负担 (NASA-TLX)。

• 成功率：成功率是针对每个参与者计算的，是成功任务的次数与所有任务次数的比率。这评估了操作物体的总体效率，因为要成功完成一个任务需要全面考虑准确性和速度。若一次实验成功，则在表格的“成功”栏记录“Y”，否则记录“N”。

• 完成时间：在每个成功完成的任务中，完成时间将被记录；对于此项度量，我们不会将失败的任务纳入考虑。我们会记录两组实验数据：包括和不包括凝视停留的时间。

北京航空航天大学毕业设计 (论文) 第 25 页

表 4.4 用户实验 1：单物体位移对接实验 - 实验结果

参试者VR

经验我们的方法 (EC) OrthoGaze (CC)

成功完成时间1SSQ

3SUS

5TLX

7成功完成时间

2SSQ

4SUS

6TLX 8

1 用过 Y 8.72s 28 87 28 Y 11.32s 37 75 45

2 熟练 Y 8.11s 31 85 18 Y 13.19s 28 79 34

3 用过 Y 9.19s 21 92 27 Y 14.94s 31 81 27

4 无 Y 9.50s 39 82 19 Y 10.09s 39 68 49

5 熟练 Y 8.44s 13 89 20 Y 13.56s 21 78 31

6 无 Y 8.98s 24 89 30 Y 12.34s 30 86 38

7 无 Y 11.51s 29 90 29 Y 13.17s 40 64 42

8 熟练 Y 8.99s 18 93 23 Y 11.31s 20 82 52

9 用过 Y 9.08s 19 88 25 Y 12.44s 33 83 30

10 用过 Y 10.27s 22 82 21 Y 13.58s 32 81 26

11 无 Y 8.33s 27 79 15 Y 11.72s 39 76 48

12 熟练 Y 9.01s 17 95 24 Y 9.86s 24 80 51

13 用过 Y 10.25s 29 71 31 Y 11.02s 35 66 39

14 用过 Y 12.29s 11 96 19 Y 14.13s 22 84 36

• 最终距离：此项度量仅针对失败的任务。最终距离是指在任务失败时刻白色立方体到目标位置的欧几里得距离 (Euclidean Metric)；我们将其归一化为最终距离除以初始距离。这种归一化反映了参试者在将物体移动到目标位置时相对于其初始位置的靠近/远离程度。

本次用户实验的实验结果汇报见表4.4。由于全部实验都成功，所以我们不再考量最终距离指标。

本次实验的均值比较情况见图4.2，可以清晰地观察到 EC 的效果是全面优于 CC 的。

图 4.2 用户实验 1：单物体位移对接实验 - 均值对比北京航空航天大学毕业设计 (论文) 第 26 页

表 4.5 用户实验 1：单物体位移对接实验 - VR 经验对应完成时间VR 使用经验完成时间无 9.50 8.98 11.51 8.33

用过 8.72 9.19 9.08 10.27 10.25 12.29

熟练 8.11 8.44 8.99 9.01

在本次实验中含一个自变量 (因子) 和一个因变量 (响应变量)：自变量为操纵方法，是一个分类变量；因变量为完成时间等结果数据，是一个连续变量。同时，所有样本都是独立的，并且通过 Shapiro-Wilk 检验发现数据皆呈正态分布 ($p_1 = 0.192 > 0.05$, p

$2 = 0.886 >$

0.05 , $p_3 = 0.958 > 0.05$, p

$4 = 0.284 > 0.05$, p

$5 = 0.443 > 0.05$, p

$6 = 0.083 > 0.05$, p

$7 =$

$0.671 > 0.05$, $p_8 = 0.821 > 0.05$)。另外，Levene 检验表明比较数据间方差齐性假设成立

(p_1

$2 = 0.061 > 0.05$, p

$3_4 = 0.745 > 0.05$, p

$5_6 = 0.969 > 0.05$, p

$7_8 = 0.076 > 0.05$)。所以，我

们可以通过一元方差分析 (One-Way ANOVA) 来获取两种对比方法的差异显著性; 检验表明, EC 与 CC 在完成时间 ($F_{12}[1, 26] = 39.445, p = 1.20 \times 10^{-6} < 0.05$)、SSQ ($F_{34}[1, 26] = 7.119, p = 0.0130 < 0.05$)、SUS ($F_{56}[1, 26] = 13.995, p = 0.000915 < 0.05$)、NASA-TLX ($F_{78}[1, 26] = 33.440, p = 4.32 \times 10^{-6} < 0.05$) 上皆有显著差异。故此, 我们可以得出结论: 我们的方法在使用效率和用户体验上显著优于同类最优方法OrthoGaze。

同时, 我们可以通过分析由我们的方法产出的实验结果是否因为参与者的 VR 经验不同而导致显著差异来判断我们的方法是否易于学习。所以, 我们提取出三种 VR 使用经验 (无、用过、熟练) 分别对应的完成时间数据到表 4.5。根据一元方差分析, 三种 VR 经验对应的完成时间数据没有显著差异 ($F_{23}[2, 11] = 2.31, p = 0.1477 > 0.05$)。故此, 我们也可以得出结论: 我们的方法具备高可学习性。

4.2.2 实验 2: 多物体操纵“积木”实验

实验设计用户实验 2 延续用户实验 1 的受试组。

在这个实验中, 参与者将被要求分别使用我们的基于头眼协同的方法和两个对照方法完成一个“积木”实验。在一次“积木”实验中, 我们确保必要操纵动作包含位移、

缩放和旋转。在实验的虚拟场景中固定放置有一张长桌; 桌面左侧是随机生成的不带碰撞检测的刚体棕色目标积木形状, 右侧是用户可操纵的带碰撞检测的刚体白色积木块; 可操纵的积木块数固定为 3, 且形状全为立方体, 因为立方体放置稳固且可以直观体现缩放和旋转的效果 (见图 4.3)。在每次实验中, 参与者需要尽快将右侧的积木通过位移、

旋转、缩放搭建为左侧的目标形状。

实验流程我们在本次实验中设置两个对照组: 参与者将分别使用我们的方法 (EC)、PRISM 方法 (CC1) [

39] 和目前基于凝视和手的最优方法 Implicit Gaze (CC2) [

36] 完成 3 次独立实验, 每次实验有 60s 的完成时间。同时, 系统实时用豪斯多夫距离 (Hausdorff Distance) 计算与目标积木形状的相似度 [

40]。在实验完成时间内, 一旦豪斯多夫距离小于某一阈值

(在此我们设定为 0.2), 则认定实验成功, 记录完成时间, 本次试验结束; 超出完成时间, 则认定实验失败, 实验结束, 记录此时的豪斯多夫距离, 作为最终距离。全部参与者完成实验后, 我们计算实验成功率, 统计完成时间 (仅针对成功的实验), 统计最终

距离 (仅针对失败的实验), 并最终以此三个客观度量评估实验结果。

实验度量

本次用户实验的实验结果汇报见表 4.6。

三种方法产出的有效完成时间的均值情况见图 4.4, 其中虚线即代表对应数据的均值。我们首先对三种对比方法产出的完成时间进行差异显著性分析。通过 Shapiro-Wilk

检验, 我们发现三组完成时间都符合正态分布 ($p_1 = 0.155 > 0.05, p_2 = 0.139 > 0.05, p_3 =$

$0.843 > 0.05$) ; 另外, Levene 检验表明比较数据间方差齐性假设成立 (p_1

$23 = 0.788 > 0.05$)

图 4.3 用户实验 2: 多物体操纵“积木”实验 - 虚拟场景北京航空航天大学毕业设计 (论文) 第 28 页图 4.4 用户实验 2: 多物体操纵“积木”实验 - 均值对比

)。所以, 我们可以使用一元方差分析来检验数据间的差异显著性; 分析显示, 三组之间至少有两组存在显著差异 ($F_{23}[2, 31] = 7.119, p$

$123 = 0.000219 < 0.05$)。随后, 我们进行 Tukey HSD 事后检验, 发现差异来源主要为 EC 和 CC1 以及 CC 2 和 CC

1。根据均值

表现, 我们可以得出结论: 我们的方法在操纵效率上显著优于 PRISM, 并且和 Implicit

表 4.6 用户实验 2: 多物体操纵“积木”实验 - 实验结果

参与者我们的方法 (EC) PRISM (CC1) Implicit Gaze (CC 2)

成功完成时间1

最终距离4

成功完成时间2

最终距离5

成功完成时间3

最终距离6

1 Y 33.59 Y 36.24 Y 24.13

2 N 0.32 N 0.21 Y 20.89
3 Y 22.47 Y 31.68 Y 28.57
4 Y 24.67 Y 43.61 Y 33.05
5 Y 28.31 Y 32.05 N 0.28
6 Y 41.23 Y 32.71 Y 26.48
7 Y 27.74 N 0.52 Y 24.73
8 Y 25.92 Y 34.39 Y 29.24
9 Y 25.35 Y 38.88 Y 31.93
10 N 0.25 N 0.36 Y 22.51
11 Y 26.04 N 0.47 Y 25.9
12 Y 29.29 Y 35.21 Y 31.04
13 Y 24.19 Y 38.12 Y 32.97
14 Y 28.28 Y 34.32 N 0.29

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 29 页Gaze 无显著差异。随后，我们进行对成功率和最终距离的分析。EC 的成功率为 85.7%，高于 CC1 的 71.4%，并且和 CC

2 的成功率保持一致。在最终距离上，通过一元方差分析，

三种方法的最终距离无显著差异（F4

$56[2, 5] = 0.933, p$

$456 = 0.453 > 0.05$ ）。故此可以得出结论：虽然三种方法的最大尝试程度没有显著差异，但我们的方法和 Implicit

Gaze 都优于 PRISM，具有可观的成功率。

目前对象操纵方法中最优的即基于手的方法，而 PRISM 是变体最多、最广泛使用的基于手的方法之一，同时 Implicit Gaze 是基于手的对象操纵方法中的最优方法[

41]。综

上所述，我们可以得出结论：该头眼协同方法不亚于任何基于手的方法，并且在效率上显著优于 PRISM 方法。

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 30 页

5 结论

5.1 结论与展望

本论文提出了一种在虚拟现实环境中基于头眼协同的对象操作方法。该方法是凝视主导且完全无手干预的，实现了包括空间平移、旋转和等比例缩放的完全 6DOF 操作。我们还提出了一个完整的方法流程和一个基于 3D 用户界面的“四叶草”模式选择菜单，让用户只需用眼动信号即可轻松切换不同的操作模式，实现了在虚拟空间中对多对象的连续交互操作。为应对眼动追踪数据的高噪音问题，我们引入了过滤算法和线性优化过程来增强用户体验，确保交互自然流畅。这种新型交互系统使身体有障碍的人或手部被占用或限制的场景中的物体操作变得更加容易。通过消除对手部的需求，这种方法为与虚拟现实环境的交互提供了一种新的方式，扩大了沉浸式体验的可用性。

综上，本次研究的主要贡献在于以下四点：

1、提出了一个基于头眼协同的、完全无手干预的对象操纵方法，实现了空间位
移、空间定轴旋转和空间等比例缩放以及各操纵模式之间的快速切换，并且显著优于当前基于头眼协同的最优对象操纵方法；

2、提出了一个“四叶草”模式选择菜单，解决了对象操纵研究的模式间切换问题，构建了一个完整的闭环操纵流程；

3、提出了一种眼动信号的滤波算法和一种头眼协同的凝视驻留点计算优化；

4、提出了一种全面测试对象操纵的“积木”用户实验，有助于相关研究对其方法效果的定量测试。

5.2 方法局限性

我们的方法主要有以下三点局限性：

1、我们对于该交互系统的预设为用户始终固定在一个位置进行操纵，所以在我们的头眼信号-对象行为的映射关系中没有考虑用户位置移动所带来的影响；

2、用户在使用眼动信号进行交互时难以做到随时观察对象的状态，导致在很多情况下需要进行多次调整，这也是系统可用性损失的最大部分；

3、我们在目标对象选择时没有考虑遮挡问题，所以我们的交互系统暂时无法快速处理目标对象被某一障碍物遮挡的情况。

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 31 页

5.3 后续工作

针对后续可开展的工作，我们首先可以针对方法的局限性进行优化和完善。为了解决固定映射影响用户体验的问题，我们可以引入相对坐标系的概念以根据用户位置而相对地生成头眼信号-对象行为的映射关系。为了解决眼动操纵时无法观察对象的问题，我们可以在目标对象处设置一个定点虚拟摄像头，并且在用户的凝视射线的一定距离处添加一个可视窗口，以实时反馈目标对象的状态。为了解决选择对象时的遮挡问题，一

个假想为设置一个预选集，其内容为用户凝视射线穿透的所有物体，供用户进行二次选择。

除此之外，我们也可以在后续的工作中创建并完善该对象操纵方法的应用程序接口

（API），允许更多的应用程序接入并使用该操纵方法，以促进更新与迭代，从而增强该操纵方法的功能和价值。

北京航空航天大学毕业设计（论文）第 32 页

致谢

来到北航之后，从士谔书院到计算机学院，我写过无数的代码。这么些年，代码改变了世界，也改变了我。在本科的尾声中，我也想以这个形式书写我的致谢：

```
1 from time import sleep 2 3
4 def thanks_parents():
5     print(' 致父母： ' )
6     print(' 感谢我的父母在本科四年一直以来的精神支持， '
7 ' 义无反顾地信任我的每个判断和决定，让我随时充满自信； '
8 ' 感谢我的父母在本科四年一直以来的经济支持，让我可以衣食无忧地专注于学业。 '
9 ' 我永远不会忘记你们的每一通电话的问候和每一箱寄来的水果。 \n' ) 10 11
12 def thanks_soulmate():
13     print(' 致文珩： ' )
14     print(' 感谢我的伴侣在我的本科期间对我始终如一的勉励和信任， '
15 ' 也感谢我们在2019年立下的约定。 '
16 ' 如果没有这个约定，我可能不会在每次计组实验那么卖力， '
17 ' 可能不会在朋友们都去嗨皮的时候去联系科研机会。 '
18 ' 是这个约定支撑我翻过每一个看似不可逾越的大山， '
19 ' 是你不变的陪伴激励我爆发出自己最大的可能性。 '
20 ' 虽然本科四年有一半以上的时间我们之间都隔着半个地球的距离， '
21 ' 但是若心联结，殊途终会同归。 '
22 ' 回望四年，每一次分别和重逢，每一次欢喜和悲伤，都万分值得。 \n' ) 23 24
25 def thanks_teachers():
26     print(' 致老师： ' ) 27
28     teachers = [ ' 王莉莉教授' , ' Prof. Xing-Dong Yang' , ' 李俊教授' , ' Prof. Jian Zhao' , ' 徐枫教授' ]
29     institutions = [ ' 北京航空航天大学' ,
30 ' Simon Fraser University' ,
31 ' 北京师范大学' ,
32 ' University of Waterloo' ,
33 ' 清华大学' ]
34     北京航空航天大学毕业设计（论文）第 33 页 34
35     teacher_dict = {i: t for i, t in zip( institutions , teachers)} 36
37     for i, t in teacher_dict.items():
38         print(" 我想对{0}的{1}致谢。".format(i, t), end=' ' )
39     print(
40 ' 感谢王老师在我的漫漫求索中为我提供的莫大帮助和对我的研究能力的培育。 '
41 ' 在虚拟现实实验室的日子可以算是我本科最有意义的日子， '
42 ' 因为我在这里确定了自己的兴趣方向。 '
43 if t == ' 王莉莉教授' else
44 ' 感谢Prof. Yang在几乎素不相识的情况下信任并接纳我进入他的人机交互实验室， '
45 ' 并且总是像关切自己的学生一样询问我的近况和难处。 '
46 ' 这段经历使我充分坚定了出国深造的决心。 '
47 if t == ' Prof. Xing-Dong Yang' else
48 ' 感谢李老师在本科期间带领我发表了第一篇国际学术论文， '
49 ' 让我体会到学术研究能够带给我的无限乐趣和成就感。 '
50 if t == ' 李俊教授' else
51 ' 感谢Prof. Zhao对我学术能力的认可，为我提供宝贵的研究生学习机会。 '
52 if t == ' Prof. Jian Zhao' else
53 ' 感谢徐老师在我大一时慷慨地为我提供有关计算机视觉和图形学的教导； '
54 ' 徐老师潜移默化教授给我的方法与理念影响了我整个本科的学习思路和历程。 \n'
55 if t == ' 徐枫教授' else ' ' ) 56 57
58 def thanks_seniors():
59     print(' 致前辈： ' ) 60
61     seniors = [ ' 刘小龙博士' , ' 徐哲尔博士' ]
62     institutions = [ ' 北京航空航天大学' , ' Dartmouth College' ] 63
64     senior_dict = {i: t for i, t in zip( institutions , seniors)} 65
66     for i, t in senior_dict.items():
67         print(" 我想对{0}的{1}致谢。".format(i, t), end=' ' )
68     print(
69 ' 感谢小龙师兄在科研中对我的各种问题不厌其烦的解答。 '
70 if t == ' 刘小龙博士' else
71 ' 感谢哲尔师兄在暑期研究中带领我有条不紊地攻破一个个难点。 \n'
72 if t == ' 徐哲尔博士' else ' ' ) 73
```

```

75 def thanks_music():
76 print(' 致音乐: ')
77 print(' 感谢北航交响乐团, 让我在本科四年时间里一直有机会坚持自己的爱好, '
78 ' 让我可以在紧张忙碌的课业之余享受音乐、卸下负担.\n' ) 79 80
81 def thanks_opportunities():
82 print(' 致机会: ')
83 print(' 感谢所有我遇到的机会, 机会即是一切.\n' ) 84 85
86 def thanks_me():
87 print(' 致自己: ')
88 print(' 感谢自己, 从未放弃任何大小之事.\n' ) 89 90
91 if __name__ == '__main__':
92 thanks_parents()
93 sleep(5)
94 thanks_soulmate()
95 sleep(5)
96 thanks_teachers()
97 sleep(5)
98 thanks_seniors()
99 sleep(5)
100 thanks_music()
101 sleep(5)
102 thanks_opportunities()
103 sleep(5)
104 thanks_me()

```

参考文献

- [1] M. Daniel, C. Ariel, G. Andrea, et al. A survey on 3d virtual object manipulation: From the desktop to immersive virtual environments: Survey on 3d virtual object manipulation [J]. Computer Graphics Forum, 2018.
- [2] R. Jaziar, M. T. A., F. Jennifer, et al. A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda [J]. Computers & Education, 2020.
- [3] P. Ivan, B. Mark, W. Suzanne, et al. The go-go interaction technique: Non-linear mapping for direct manipulation in vr[C]//Proceedings of the 9th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. [S.l.: s.n.], 1996.
- [4] D. A. Bowman, L. F. Hodges. An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments[C]//Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics (I3D ' 97). [S.l.: s.n.], 1997.
- [5] S. Frees, G. D. Kessler. Precise and rapid interaction through scaled manipulation in immersive virtual environments[C]//IEEE Proceedings. VR 2005. Virtual Reality. [S.l.: s.n.], 2005.
- [6] C. Wilkes, D. A. Bowman. Advantages of velocity-based scaling for distant 3d manipulation[C]//Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST ' 08). [S.l.: s.n.], 2008.
- [7] A. Chris, G. Mark, F. Scott. Increasing precision for extended reach 3d manipulation[J]. International Journal of Virtual Reality, 2015.
- [8] N. Osawa. Two-handed and one-handed techniques for precise and efficient manipulation in immersive virtual environments[J]. roceedings of the 4th International Symposium on Advances in Visual Computing (ISVC ' 08), 2008.
- [9] M. Anthony, C. Géry, G. Laurent. The design and evaluation of 3d positioning techniques for multi-touch displays[C]//2010 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI). [S.l.: s.n.], 2010.
- [10] M. Anthony, C. Géry, G. Laurent. The effect of dof separation in 3d manipulation tasks with multi-touch displays[C]//Proceedings of the 17th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. [S.l.: s.n.], 2010.
- [11] H. Mark, ten Cate. Thomas, C. Sheelagh. Sticky tools: Full 6dof force-based interaction for multi-touch tables[C]//Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces. [S.l.: s.n.], 2009.
- [12] R. J. L., D. P. L., H. J. Y. A screen-space formulation for 2d and 3d direct manipulation

- [C]//Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. [S.l.: s.n.], 2009.
- [13] S. Houde. Iterative design of an interface for easy 3-d direct manipulation[C]//Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '92). [S.l.: s.n.], 1992.
- [14] C. B. D., S. S. S., H. K. P., et al. Three-dimensional widgets[C]//Proceedings of the 1992 Symposium on Interactive 3D Graphics. [S.l.: s.n.], 1992.
- [15] M. Daniel, L. Pedro, F. Alfredo. Hands-on interactive tabletop lego application[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology. [S.l.: s.n.], 2011.
- [16] A. O. Kin-Chung, T. Chiew-Lan, F. Hongbo. Multitouch gestures for constrained transformation of 3d objects[J]. Computer Graphics Forum, 2012.
- [17] G. P. Christopher, S. Wolfgang, H. JungHyun. Pinnpivot: Object manipulation using pins in immersive virtual environments[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2021.
- [18] A. I.B., M. P., F. E. Eye tracking in virtual reality: a broad review of applications and challenges[J]. Virtual Reality, 2023.
- [19] S. Ludwig, G. Hans. Eye & head: Synergetic eye and head movement for gaze pointing and selection[C]//Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. [S.l.: s.n.], 2019.
- [20] T. Vildan, J. R. J. K. Interacting with eye movements in virtual environments[C]//Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. [S.l.: s.n.], 2000.
- [21] H. J. Paulin, R. Vijay, M. I. Scott, et al. A fitts' law study of click and dwell interaction by gaze, head and mouse with a head-mounted display[C]//Proceedings of the Workshop on Communication by Gaze Interaction. [S.l.: s.n.], 2018.
- [22] L. F. Lopez, S. Veronica. A comparative study of eye tracking and hand controller for aiming tasks in virtual reality[C]//Proceedings of the 11th ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications. [S.l.: s.n.], 2019.
- [23] J. R. J. K. What you look at is what you get: Eye movement-based interaction techniques[C]//Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. [S.l.: s.n.], 1990.
- [24] J. Rob, S. Sophie. What you look at is what you get: Gaze-based user interfaces[J]. Interactions, 2016.
- [25] K. Devender, S. Amit. Electrooculogram-based virtual reality game control using blink detection and gaze calibration[C]//2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). [S.l.: s.n.], 2016.
- [26] P. Ken, M. Benedikt, M. Diako, et al. Gaze + pinch interaction in virtual reality[C]//Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction. [S.l.: s.n.], 2017.
- [27] P. Y. Suen, D. Tilman, K. Kai. Assessing hands-free interactions for vr using eye gaze and electromyography[J]. Virtual Reality, 2019.
- [28] Q. Y. Yuan, T. R. J. The eyes don't have it: An empirical comparison of head-based and eye-based selection in virtual reality[C]//Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction. [S.l.: s.n.], 2017.
- [29] S. Ludwig, C. Christopher, Z. Xuesong, et al. Outline pursuits: Gaze-assisted selection of occluded objects in virtual reality[C]//Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. [S.l.: s.n.], 2020.
- [30] M. Päivi, B. Andreas. Eye tracking and eye-based human-computer interaction[M/OL]. Springer London, 2014. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6392-3_3.
- [31] B. Eric, L. Jean, P. Arthur, et al. Continuous auditory feedback of eye movements: An exploratory study toward improving oculomotor control[J]. Frontiers in Neuroscience, 2017.
- [32] B. Jonas, R. Patrick, P. Thies. Advantages of eye-gaze over head-gaze-based selection in virtual and augmented reality under varying field of views[C]//Proceedings of the Workshop on Communication by Gaze Interaction. [S.l.: s.n.], 2018.
- [33] M. Pallavi, G. W. Boon, F. Chi-Wing, et al. Dualgaze: Addressing the midas touch problem in gaze mediated vr interaction[C]//2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct). [S.l.: s.n.], 2018.
- [34] H. Teresa, C. Maurice, R. Enrico, et al. A survey of digital eye strain in gaze-based interactive systems[C]//ETRA '20: 2020 Symposium on Eye Tracking Research and Applica-

- tions. [S.l.: s.n.], 2020.
- [35] C. Liu, A. Plopski, J. Orlosky. Orthogaze: Gaze-based three-dimensional object manipulation using orthogonal planes[J]. Computers & Graphics, 2020.
- [36] Y. Difeng, L. Xueshi, S. Rongkai, et al. Gaze-supported 3d object manipulation in virtual reality[C]//Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. [S.l.: s.n.], 2021.
- [37] Y. Y. Qian, R. J. Teather. The eyes don't have it: An empirical comparison of head-based and eye-based selection in virtual reality[C]//Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction. [S.l.: s.n.], 2017.
- [38] J. S. Maxwell, C. M. Schor. The coordination of binocular eye movements: Vertical and torsional alignment[J]. Vision Research, 2006.
- [39] K. Kyungyoon, L. R. L., K. Nikki, et al. Anatomical 2d/3d shape-matching in virtual reality: A user interface for quantifying joint kinematics with radiographic imaging[C]//2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI). [S.l.: s.n.], 2017.
- [40] A. A. Taha, A. Hanbury. An efficient algorithm for calculating the exact hausdorff distance [J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2015.
- [41] M. Pedro, G. Guilherme, C. Hugo, et al. Hands-free interaction in immersive virtual reality: A systematic review[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2021.
- [42] M. Daniel, R. Filipe, F. Alfredo, et al. The benefits of dof separation in mid-air 3d object manipulation[C]//Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology. [S.l.: s.n.], 2016.
- [43] C. Daniel, H. Christopher, B. Cindy, et al. Using hmd for immersive training of voice-based operation of small unmanned ground vehicles[M/OL]. Springer International Publishing, 2019. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-21565-1_3.
- [44] M. M. A., C. J.-R., M. F., et al. Navigation and interaction in a real-scale digital mock-up using natural language and user gesture[C]//Proceedings of the 2014 Virtual Reality International Conference. [S.l.: s.n.], 2014.
- [45] A. Ferracani, M. Faustino, G. X. Giannini, et al. Natural experiences in museums through virtual reality and voice commands[C]//Proceedings of the 25th ACM International Conference on Multimedia. [S.l.: s.n.], 2017.
- [46] P. D. A. G. F. D. et al. Types of eye movements and their functions[M/OL]. Sinauer Associates, 2001. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK10991/>.

说明: 1. 总文字复制比: 被检测论文总重合字数在总字数中所占的比例

2. 去除引用文献复制比: 去除系统识别为引用的文献后, 计算出来的重合字数在总字数中所占的比例

3. 去除本人文献复制比: 去除作者本人文献后, 计算出来的重合字数在总字数中所占的比例

4. 单篇最大文字复制比: 被检测文献与所有相似文献比对后, 重合字数占总字数的比例最大的那一篇文献的文字复制比

5. 复制比: 按照“四舍五入”规则, 保留1位小数

6. 指标是由系统根据《学术论文不端行为的界定标准》自动生成的

7. **红色文字**表示文字复制部分;**绿色文字**表示引用部分(包括系统自动识别为引用的部分);**棕灰色文字**表示系统依据作者姓名识别的本人其他文献部分

8. 本报告单仅对您所选择的比对时间范围、资源范围内的检测结果负责



 amlc@cnki.net

 <https://check.cnki.net/>