**1 Introduction 4k**

在进入对正式研究课题的探讨之前，我想就该论文的研究背景做一些介绍，主要出于以下几点原因，

第一，本次研究主题所在的人机交互领域本就是多个学科交叉做产生的综合性学科[[1]](#footnote-0)[[2]](#footnote-1)，要求读者对于多个领域均需要有一定的背景知识，通过对研究背景的补充，可以提供更加良好的阅读体验，更好的帮助读者理解和思考本篇论文的研究主题。

1. 通过对研究主题的细分和挖掘，可以更好得展现本篇论文的逻辑性，并确保提出的研究问题的解决范围以及展现本次研究的必要性和价值所在。
2. 本论文不仅仅是一份对于研究课题的陈述报告，同时也是对于笔者本人修士课程过程中所有努力的总结和报告，而在较为清晰和明确的研究课题提出之前，笔者也是对多个领域进行了大量的考察以及试错，本人认为非常有必要在本次论文中被提及以及说明。

Before delving into the formal discussion of the research topic, I would like to introduce the research background of this paper, mainly for the following reasons:

First, the field of Human-Computer Interaction, which is the research theme of this study, is an interdisciplinary field that requires readers to have a certain background knowledge of multiple areas. By supplementing the research background, a better reading experience can be provided, and it can better help readers understand and contemplate the research theme of this paper.

Second, by subdividing and digging into the research theme, the logic of this paper can be better demonstrated, thereby ensuring the rationality of the proposed research questions and the necessity of this research.

Third, this paper is not just a statement report on the research topic, but also a summary and report of all the efforts I made during my master's course. Before a clear and definite research topic was proposed, I also conducted a lot of investigations and trials in multiple fields. I believe it is very necessary to be mentioned and explained in this paper.

**1.1. Human–computer Interaction and Virtual Reality 1k**

**1.1.1 The Influence of VR Technology on HCI 500**

自1983年人机交互该理念被普及以来，HCI相关的研究人员就有关计算机如何与人类更好的交互这一命题进行长久以来的观察和研究，并且在该理论提出的同时就强调了计算机与人类之间的交互方式有别于其他有限用途的工具，计算机的用途在应用范围上是更加的广泛，所以将计算机和人类的交互类比为人与人之前的对话过程。而在计算机协会中也将人机交互定义为“一门与设计、评估和实现供人类使用的交互式计算系统以及研究它们周围的主要现象有关的学科”[[3]](#footnote-2)，并且在ACM之后的定义以及中也声明该学科同时从计算机发展技术和人为因素类学科，甚至工程和设计方法都是存在相关的联系。

虽然有关人机交互的发展历史虽然有很多不同的划分方式[[4]](#footnote-3)，但是有这样几个里程碑式的结点，

在早期的计算机系统中以批处理[[5]](#footnote-4)和CLI的发展，引入早期实时交互[[6]](#footnote-5)的概念

再到拥有GUI、键鼠、以及配套基础设施完善的个人电脑，标志着HCI的诞生

再到普适计算[[7]](#footnote-6)的发展，极大得推动了计算机发展以及HCI概念

直至目前包括互联网、智能手机、数字技术等卓越发展，HCI已经扩展到网页设计、移动应用程序等交互设计，现代HCI在属性发展上也不单单只是追求易用性，还包括了用户体验[[8]](#footnote-7)、用户参与、社交计算等多属性特征。

在多个论文和文章[[9]](#footnote-8)中也都提及到以vr、ar技术为代表的混合现实技术在近几年来再一次极大地推动了HCI的发展，尤其是在用户交互界面方面，例如在这篇文章[[10]](#footnote-9)中明确指出沉浸式现实技术在虚拟遗产体验方面可以提供个性化体验和定制的数字内容，有助于用户和文化背景之间建立上下文关系，以及提高用户对于虚拟环境的参与度。

同时相关研究人员也在虚拟现实的技术和设计的基础上遵循以人为中心的设计原则，讨论了如何通过用户的需求和体验来设计和评估虚拟现实系统，延续了人机交互在虚拟现实技术上的发展与理论支撑。

**1.1.2 Spatial Computing of VR 500**

目前我们在计算机图形领域，已经超越了一般的平面画面表现，例如在照片或者影视级别上的平面分辨率可以高达8k或者12k，已经完全满足了人眼正常分辨的能力，所以在平面的画面表现或者说通过显示器的视觉窗口，当前的平面视觉已经到达无限接近于真实水平。而平面计算相对应的就是以三维计算以及其周围环境计算的空间计算。

而对于空间计算概念的出现，根据有记载的文献记录[[11]](#footnote-10)来说被定义为”human interaction with a machine in which the machine retains and manipulates referents to real objects and spaces"，同时作者强调了空间计算中的物体首先需要有在实际世界中的价值，空间计算自身是依托于现实世界中已有的物体，和三维建模或者数字设计等领域不同，空间计算的目标物体需要在现实中的等同或者相近的物体做为参照，并且在计算机的过程中不仅仅需要考虑到在笛卡尔三维坐标系中的对应位置与关系，同时也包含了物体周围环境的表现信息。所以空间计算概念的先进之处在于强调了计算中的物理性与空间性，不在将空间做为抽象概念，而是做为首要的影响目标，从而可以更好的将计算机和我们的现实所相结合，在一定程度上与数字孪生有所联系。

所以在HCI的研究教授的谈话[[12]](#footnote-11)中提到，混合现实只是一种通俗叫法，而混合现实对对应的底层范式，空间计算，才是在人机交互领域内更有价值提及方式，而在他的谈话中也提到以VR AR为代表的空间计算方式之所以和之前的交互方式不同，是因为空间计算不再是二维的表现方式。

空间计算和虚拟现实技术之间的关系是相辅相成的，空间计算被认为是虚拟现实技术的理论出发点，而诸如VR AR MR等虚拟现实技术被认为是目前计算机科学对于空间计算概念的表现形式[[13]](#footnote-12)，用户可以通过与环境的交互处理和理解信息，而虚拟现实也可以通过多类型的传感器来检测空间中的变化并做出实时调整，从而给用户提供更加直观和丰富的交互体验。

**1.1.3 The Development of VR Technology 500**

和空间计算相比，也许以vr为代表的虚拟现实技术可能更为大众所熟知，虚拟现实在广义上包括了vr ar mr等多种表现形式，这三种表现形式都涉及到了现实空间和虚拟空间的交互形式，也都在底层的范式上使用了空间计算。由于本篇论文研究的主题主要建立在虚拟场景下的实现场景，故对于ar mr这两种相关技术将不在此说明和介绍。

虚拟现实技术是所有该类别中最具代表性也是最先被证明在研究和应用领域中会对计算机发展和人类社会发展有着巨大益处的技术。对于vr的定义有多种说法，例如在代表性文章[[14]](#footnote-13)中vr被描述为”VR is an interactive and immersive (with the feeling of presence) experience in a simulated (autonomous) world.” 同时在其他类似但不完全相同的定义中均提到VR具有高沉浸感，环境感知与环境交互这三个特点[[15]](#footnote-14)，而根据这三点vr可以被划分为Desktop VR,Fish Tank VR, Immersive systems这三种不同层次的系统。

虽然虚拟现实技术没有明确的发展历史，但是在里程碑式的发展结点代表了不同层次的vr技术，最早可以追溯到1962的Sensorama模拟器首次提供了包括音频、嗅觉、触觉等较为全面的感官体验，在1968年的Sword of Damocles被认为是首个虚拟现实头显，之后在1980年代出现了例如dataglove，eyephone，boom等商业化虚拟现实设备。随着虚拟现实技术的发展以及成本的降低，在2010年之后，涌现以Oculus HTCVIVE PlaystationVR为代表的现代虚拟现实头盔。至今以来在技术发展的同时，应用领域也逐渐从游戏和娱乐到教育 训练 医疗 社交等多方面发展，各种与之相关的创新型技术例如眼球追踪、手势识别、全身追踪甚至人工智能的发展都在使VR体验变得更加真实和沉浸。

正如在某份以热门VR应用BeatSaber做为分析案例的报告中指出用户对于目标物体的观察和互动已经逐渐从平面屏幕的布局向周围的空间所转移。该文章用较为通俗的方式总结了虚拟技术对于真实感的构成因素和未来虚拟技术不单单局限在单一视觉上的发展方向。

**1.2. Virtual Reality and Haptic 1k**

**1.2.1 Multisensory and Synesthesia 500**

在虚拟现实技术被定义的时候就强调了，虚拟空间中的沉浸感不仅仅受视觉因素的影响，在空间计算中的定义中也被强调，除目标物体自身以外，目标物体周遭的环境也应该被纳入计算范围之内，包括听觉 嗅觉 触觉等等。而在这篇报告[[16]](#footnote-15)中就指出额外的感觉输入可以增加在虚拟环境中的存在感，并增加对虚拟环境中物体的记忆。增加视觉以外的感觉线索可能是一种有效的方式来管理在虚拟环境中存在的细节水平和帧速率的权衡。

而这种提供用户多感觉信息的处理方式在认知心理学上被称为Multisensory 和Synesthesia。Multisensory 和Synesthesia是两个相近但是不完全相同的概念，根据神经科学的相关研究表明[[17]](#footnote-16)，多种感官之间的协同作用或互相作用以及他们的信息内容的融合被叫做，multisensory integration，从而生成a cross-modal stimulus combination，通过这种组合的作用来完成完成对某种类型的反应。而这种多感官响应的延迟时间明显短于任一组件单感官响应。除此以外，多感官的信息来源还可以增强甚至创造某一单一感知体验，在这一点上和联觉现象有着相似的作用效果。

在共感领域方面有着重要参考价值的一书[[18]](#footnote-17)中将联觉解释为”joined sensation”，具体表现为其中一种的感觉的体验在非自愿的情况下转化为另一种感官体验。例如在联觉现象的人眼中，看到数字的同时会赋予数字颜色，感觉到味觉和嗅觉的同时也能感受到对物体的轮廓、质地、重量和温度等等额外的信息。和多感类似，通过多模态方法在虚拟现实环境下建立人工联觉可以极大增强沉浸式vr在系统引导以及引导用户注意力方面的性能[[19]](#footnote-18)。

**1.2.2 The Necessity of Haptic Technology 500**

无论是空间计算还是多感觉体验，这些当下较为前言的研究趋势都表明，在之后的VR发展中，在过去传统的人机交互中，单纯使用平面化的图形交互以及视听信息都不足以表现虚拟现实技术所需要的沉浸感，同时在多篇文章[[20]](#footnote-19)[[21]](#footnote-20)都提及到触觉反馈对于增强vr系统的沉浸感、交互性是必不可少的。而目前主要的商业vr游戏或者vr视频仅仅只提供良好的视觉和触觉反馈，而对于触觉的感知信息主要以震动为主。

除了在感知能力上的丰富以外，发展触觉的另一个必要性是触觉的主动性，也就是说触觉应该是为了达成某一目的或者行为而主动发出的触觉，换句话说触觉信息不仅仅是用户得到的输入信息，还承担了和视觉听觉所不同的输入功能。并且其中包含的信息根据用户不同的使用场景和使用意图所需要的情报并不相同，如何将综合信息解析并根据用户挑选出所需要的触觉信息[[22]](#footnote-21)也是发展触觉的主要课题之一。

并且在经典的多模态结构中，触觉担任着连接各个感知信息之间的桥梁，例如通过触觉上的触摸和抓取向用户传达物体的形状、大小、粗糙、温度等等。而且这个交互过程往往是需要用户进行主动选择，总得来说在完整的多模态感知结构中，多模态感知需要触觉来提供信息来源，来提高多模态的质量和深度。

**1.2.3 Development and Application of Haptic Technology 500**

与人机交互类似，触觉技术的发展也可以在根据个人计算机的技术发展也大致可以分为三个阶段20，

桌面触觉，桌面触觉主要用于桌面环境下，通常由一个具有一定自由度的机械杆来提供操作，来提供某一种真实物理触感的反馈，例如目标物体的形状或者阻力，设计目标主要集中在手术模拟或者机械操作训练中。

表面触觉，表面触觉主要以智能手机、平板电脑等为目标平台，主要致力于创建手指和物体表面之间的直接接触信息，例如手指可以感受到物体表面的轮廓、粗糙度等。例如现在被广泛应用在手机上的机械震动，在屏幕上按下一个按钮，手机就会产生相应的震动从而模拟手指和真实按钮之间的互动行为。

可穿戴触觉，近年来随着vr技术的发展和商业vr设备的逐渐普及，如何实现在vr空间内为整个手部提供力反馈，并支持手指在全方向的自由度下通过不同的手势进行较为细致的操作例如触摸、抓取、操纵等复杂动作。目前主要的研究趋势是触觉手套，各大科技公司也都推出了，但对于力反馈手套具体需要哪些功能，有怎样的标准目前还没有被明确说明。在较为理想化的触觉手套解决方案之外，还有很多触觉方案选择了指尖反馈设备、手持反馈设备以及控制器类型力反馈设备，但是他们的相同点都有着相同的目标是在虚拟空间下用户的手势交互有着和现实中一样的手势交互。

**1.3. Haptic and Automation 1k**

**1.3.1 Telexistence and Artificial Intelligence 500**

虚拟现实技术不仅仅可以用来给用户创建虚拟场景，高沉浸和高交互性还可以将用户场景跨越空间进行传递，例如用户在家中使用头显从而实现远程办公，而虚拟现实技术与机器人技术相结合可以实现物理意义上的存在，尤其在covid19的爆发极大地影响了用户的活动和接触行为，所以也是有着很多的研究人员致力于将vr、触觉、以及机器人技术相结合，建立一套被叫做远程存在的遥感控制系统。和以往的远程呈现系统[[23]](#footnote-22)的不同点在于，现代的远程存在系统积极使用多感觉传感器，不仅仅在视听效果上可以做到身临其境，而且可以在行为上产生实际的物理交互，例如触摸、操作、抓取等复杂运动行为，在具体的表现形式上也不再是局限于类人型的机器人设备，开始出现例如软体机器人、机械臂、甚至是可穿戴式[[24]](#footnote-23)等更具灵活性的存在形式。

此外在谈及到机器人制作及时之余，就离不开做为机器人大脑一般存在的人工智能，做为与机器人核心的技术，不出意外地也被多次尝试到与VR[[25]](#footnote-24)或者远程存在技术相结合，类似于在非用户自主控制时的控制解决方案，在较为经典的人工智能理论书籍[[26]](#footnote-25)中，人工智能被定义为”the study of agents that receive percepts from the environment and perform actions.”，强调perception action做为两个关键组成部分，而perception action也是在之前的说明中多次被虚拟现实技术和触觉技术所提及，所以在发展远程存在技术的同时，不可避免的需要考虑到人工智能在远程存在技术中所扮演的角色以及用户和人工智能之间的交互关系。

**1.3.2 The Sense of Agency 500**

随着自动化技术和人工智能技术的发展之后，在人机交互的交互过程中，我们也就不再是单一的控制行为，计算机将完成从工具到智能工具的转变，并且技术的发展最大的便利就是将复杂的事物进行简单化，例如突破空间和时间的束缚，将远程的东西变得很近，将过去很久的东西保留至现在，而在简化或者自动化的过程中提高了任务效率的同时，也带来了很多问题，决策透明度就是其中之一。

决策透明度也就是指决策过程的清晰和可理解程度，推广到AI驱动的自动化行业中，就是当前设备的行为是否被AI或者用户所决定，换句话说，当用户在使用自动化设备的同时究竟是AI系统操纵了整个行为过程还是用户自身操纵了整个行为过程，还是用户和AI系统共同决策的结果。在多个文章[[27]](#footnote-26)也被提及到，能动性是决定用户和世界互动的基本和持续的基础。

在部分研究中也已经证明了多感官[[28]](#footnote-27)组合（例如视觉运动和视觉触觉）可以在虚拟现实中增强用户对于虚拟身体的权限，但在用户和同样具有强意识的AI系统进行合作的时候，触觉是否还是会相同增强用户和自动化设备之间的联系，以及是否提升代理感也是本次论文的主要讨论内容。

**（1.3.3 Haptic and AI 500）**

**1.4. Research Objectives 1k**

**1.4.1 Research Objectives 500**

本次的论文以用户对于虚拟空间中对运动的感知程度为出发点开始进行研究。并在之后的多次尝试与测试后，将研究目标制定为对虚拟空间中运动物体为研究目标，对运动的感知也精确到对于自运动物体的运动状态为输出目标。

希望可以通过本次研究中设计的力学设备向用户精确传达自运动物体运动状态的力学反馈，包括了常见的位移变化和角度变化。从而解决用户在虚拟空间中对于运动物体状态在力觉反馈上的不足，并且在有效的力学反馈之后，考虑到在使用ai系统下的自动化运行环境中，通过传达自动化设备的运动状态是否可以提升用户的使用体验和代理感觉。探索丰富力触觉技术在技术实现上的可行性以及有效的丰富力触觉技术是否可以提升用户和智能系统之间的交互。

**1.4.2 研究目标迭代记录 500**

本次研究的目标其实在项目早期并不是被准确定义的，在核心思想（虚拟空间、空间计算、力触觉、运动感知）被固定的前提下，研究目标被细分或者重新解释，包括以下子目标：

1. 研究用于向用户传递在虚拟空间中对于击剑格挡动作的力反馈装置

2. 研究如何简化向用户传递物理提示的力反馈装置

3. 研究和分析当前的力反馈装置在研究和设计上的趋势，并查找与本研究目标相同或一致的解决方案。

4. 研究如何设计用于向用户传递虚拟空间中自运动物体的运动状态的力学设备，并验证其有效性。

5. 研究向运动状态提示的力学装置是否会影响用户和搭载有AI系统的自动化设备之间的使用感觉和交互模式。

**1.5. Structure TBD**

在本次论文的第一章节中主要对本次研究课题所涉及的知识背景进行介绍，包括但不限于人机交互、虚拟现实与空间计算、多感官感知集成和力触觉以及代理感与人工智能。

在第二章节中，首先对于力触觉相关的综合调查文献的复盘与总结，之后针对与本次研究主题在有些概念和设计具有相似点的研究项目做出介绍和评价，来进一步展现本次研究的独特性与必要性。

在第三章节中，介绍了本次研究目标的多次迭代化设计尝试，到最终MotionAvatar的概念设计与实现，以及在先行实验中展现的可行性。

在第四章中，通过设计两个实验分别证明了MotionAvatar系统在力反馈表现上的有效性和在提升代理感上的有效性。

第五章通过实验结果对本次论文的研究目的进行分析和说明。

第六章对本次论文以及整个修士课程中的收获进行总结和报告。

1. Human-Centered Artificial Intelligence https://doi.org/10.1016/C2020-0-02460-6 [↑](#footnote-ref-0)
2. Philosophy of Technology and Engineering Sciences 978-0-444-51667-1 [↑](#footnote-ref-1)
3. Hewett; Baecker; Card; Carey; Gasen; Mantei; Perlman; Strong; Verplank. "ACM SIGCHI Curricula for Human–Computer Interaction". ACM SIGCHI. Archived from the original on 17 August 2014. Retrieved 15 July 2014. [↑](#footnote-ref-2)
4. The Human-Computer Interaction Handbook https://doi.org/10.1016/B978-0-444-81862-1.X5065-1 [↑](#footnote-ref-3)
5. Human-computer interaction in real-time instrument systems [↑](#footnote-ref-4)
6. Real-time systems and human centred computing: an emerging symbiosis [↑](#footnote-ref-5)
7. The Computer for the 21st Century [↑](#footnote-ref-6)
8. September 2014 Theme: Human-Computer Interaction: Present and Future Trends [↑](#footnote-ref-7)
9. The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality [↑](#footnote-ref-8)
10. A Comparison of Immersive Realities and Interaction Methods: Cultural Learning in Virtual Heritage [↑](#footnote-ref-9)
11. Greenwold, Simon (June 2003). "Spatial Computing" [↑](#footnote-ref-10)
12. Spatial Computing, the next paradigm of Human-Computer Interaction [↑](#footnote-ref-11)
13. A new era of spatial computing brings fresh challenges—and solutions—to VR [↑](#footnote-ref-12)
14. Virtual Reality - History, Applications, Technology and Future [↑](#footnote-ref-13)
15. The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature [↑](#footnote-ref-14)
16. Evaluating the Importance of Multi-sensory Input on Memory and the Sense of Presence in Virtual Environments [↑](#footnote-ref-15)
17. Multisensory integration: current issues from the perspective of the single neuron [↑](#footnote-ref-16)
18. Wednesday Is Indigo Blue [↑](#footnote-ref-17)
19. Advancing Attention Control Using VR-Induced Multimodal Artificial Synesthesia [↑](#footnote-ref-18)
20. Haptic display for virtual reality: progress and challenges [↑](#footnote-ref-19)
21. Active Haptic Perception in Robots: A Review [↑](#footnote-ref-20)
22. Learning to integrate arbitrary signals from vision and touch [↑](#footnote-ref-21)
23. Spatial Computing and Intuitive Interaction: Bringing Mixed Reality and Robotics Together [↑](#footnote-ref-22)
24. Piton: Investigating the Controllability of a Wearable Telexistence Robot [↑](#footnote-ref-23)
25. Neural 3D Holography: Learning Accurate Wave Propagation Models for 3D Holographic Virtual and Augmented Reality Displays [↑](#footnote-ref-24)
26. Artificial Intelligence: A Modern Approach [↑](#footnote-ref-25)
27. The experience of agency: an interplay between prediction and postdiction [↑](#footnote-ref-26)
28. Measuring the effects through time of the influence of visuomotor and visuotactile synchronous stimulation on a virtual body ownership illusion. [↑](#footnote-ref-27)