 单位代码 **10006**

学 号 **18373298**

1分类号

****

毕业设计(论文)

基于操作场引导的虚拟对象协同操作方法的设计与实现

|  |  |
| --- | --- |
| 学院名称 | 计算机学院 |
| 专业名称 | 计算机科学与技术 |
| 学生姓名 | 栾帅 |
| 指导教师 | 王莉莉 |

2022年 6月

基于操作场引导的虚拟对象协同操作方法的设计与实现

栾帅

北

京

航

空

航

天

大

学

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：

基于操作场引导的虚拟对象协同操作方法的设计与实现

Ⅱ、毕业设计（论文）使用的原始资料（数据）及设计技术要求：

技术要求为设计一个可供用户找到更好操作视点的操作场，该场需要能够清晰的可视化，且能够帮助用户提高操作效率和精度。要求能够使用C#在Unity系统中进行代码开发，能够使用Computer Shader，能够使用SteamVR进行VR开发。

Ⅲ、毕业设计（论文）工作内容：

本文使用Unity进行场景搭建，使用导航网格生成可行走区域并采样，对采样后的点进行数量和位置优化，使用批处理进行帧率优化。同时构建一个能够度量用户操作难易程度的度量函数TRS，使用TRS进行场的可视化，引导用户完成操作。同时我们设计了一个用户实验，验证了本方法的有效性。

Ⅳ、主要参考资料：

Wang L, Liu X, Li X. VR Collaborative Object Manipulation Based on Viewpoint Quality[C]//2021 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). IEEE, 2021: 60-68.

Freitag S, Weyers B, Kuhlen T W. Automatic speed adjustment for travel through immersive virtual environments based on viewpoint quality[C]//2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI). IEEE, 2016: 67-70.

Freitag S, Weyers B, Kuhlen T W. Interactive exploration assistance for immersive virtual environments based on object visibility and viewpoint quality[C]//2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). IEEE, 2018: 355-362.

计算机 学院 计算机科学与技术 专业 180611 班

学生 栾帅

毕业设计（论文）时间： 2022 年 月 日至 2022 年 月 日

答辩时间： 2022 年 6 月 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：栾帅

签字：

时间：2022年 6 月

#### 基于操作场引导的虚拟对象协同操作方法的设计与实现

学 生：栾 帅

指导教师：王莉莉

摘 要

对象操作是虚拟现实 (VR) 中的基本交互。如何准确高效地对物体操作关系到用户的沉浸感体验。在用户可以自由移动的操作场景中，如何帮助用户找到场景中更适合操作的操作位置是一个非常有挑战性的问题。为了解决这个问题，我们引入了一种协同对象操作引导场引导的操作方法，以引导用户找到更好的操作视点，加速用户操作，提高操作精度。在虚拟现实中操作一个物体时，场景中存在一些更适合操作的操作点，可以清楚地观察到要操作的物体和目标位置，使用户更加高效准确的操作物体。我们根据虚拟场景结构、操作对象和目标构建了一个协同对象操作引导场，其中包含平移度量，旋转度量和缩放度量三个部分。我们提出了三种协同对象操作引导场的可视化方法：小球可视化，小地图可视化，地面色块可视化，从而引导多用户协同操作对象。我们设计了一项用户研究测试了协同对象操作引导场的可视化方法，其中一个用户只负责平移物体，另外一个用户只负责旋转和缩放物体，通过假设检验法验证了我们方法的有效性。与没有引导场的方法相比，小球可视化和地面色块可视化方法在任务完成时间、平移精度、旋转精度、用户参与度和任务负载方面都有显著提高。其中地面色块附加地图可视化方法是用户最喜欢的协同对象操作引导场的可视化方法。

关键词：虚拟现实，协同操作，操作场

**Design and Realization of Virtual Object Collaborative Manipulation Method Based on Manipulation Field Guidance**

Author: Luan Shuai

Tutor: Wang Lili

**Abstract**

Object manipulation is a fundamental interaction in virtual reality (VR). Efficiency and accuracy of object manipulation are important to provide users with a sense of immersion. In an operation scene where the user can move freely, how to help the user to find a more suitable operation position in the scene is a very challenging problem. In order to solve this problem, We introduce a manipulation method guided by a collaborative object manipulation guiding field (MGF) to improve the efficiency and accuracy of object manipulation in multi-user virtual reality applications. When manipulating an object in VR, there are some more suitable manipulation viewpoints in the scene, where users can observe the manipulated object and target position clearly, so that the user can manipulate the object more efficiently and accurately. We construct a MGF based on the virtual scene structure, manipulated objects and targets, which includes three parts: translation metric, rotation metric and scaling metric. We propose three visualization methods for MGF: small ball visualization, minimap visualization, and ground color patch visualization, so as to guide multi-user cooperative manipulation of objects. We designed a user study to test the visualization method of MGF, where one user is only responsible for translation of the object, and the other user is only responsible for rotation and translation. Compared with previous methods, both the ball visualization and the ground color patch visualization methods have significant improvements in task completion time, translation accuracy, rotation accuracy, user engagement, and task load. Among them, the additional map visualization method of ground color patches is the user’s favorite visualization method for MGF.

**Key words**: Virtual reality, Collaborative object manipulation, Manipulation guiding field

**目 录**

[1 绪论 1](#_Toc19300)

[1.1 课题背景与意义 1](#_Toc25705)

[1.2 研究目标 2](#_Toc12045)

[1.3 研究内容 3](#_Toc13367)

[1.4 论文组织结构 4](#_Toc17132)

[2 国内外研究现状 5](#_Toc5094)

[2.1 对象操作 5](#_Toc25243)

[2.2 单人操作 6](#_Toc18113)

[2.3 多人协同操作 8](#_Toc10736)

[2.4 人工势场 9](#_Toc4147)

[3 基于操作场引导的虚拟对象协同操作方法的设计与实现 11](#_Toc12776)

[3.1 操作场的初始化 11](#_Toc892)

[3.2 操作场TRS的计算 14](#_Toc3608)

[3.3 操作场的可视化 16](#_Toc17897)

[3.4 本章小结 17](#_Toc22140)

[4 用户实验及结果分析 19](#_Toc32734)

[4.1 实验设计 19](#_Toc10455)

[4.1.1 操作方法 19](#_Toc23357)

[4.1.2 场景描述 20](#_Toc9735)

[4.1.3 实验方法 20](#_Toc8682)

[4.1.4 度量指标 21](#_Toc21233)

[4.2 实验结果分析 22](#_Toc25976)

[4.2.1客观度量 22](#_Toc16895)

[4.2.2主观度量 27](#_Toc8521)

[4.2.3结果分析 28](#_Toc20795)

[结论与展望 30](#_Toc4775)

[1 工作及研究总结 30](#_Toc27275)

[2 缺点与不足 30](#_Toc7835)

[3 工作展望 30](#_Toc24226)

[致谢 31](#_Toc7059)

[参考文献 32](#_Toc30880)

# 绪论

## 1.1 课题背景与意义

虚拟现实是新一代信息技术的集大成者，有望成为计算机、智能手机之后的下一代通用技术平台。随着虚拟现实核心技术产品日益成熟，全球虚拟现实产业进入新一轮的爆发期。以虚拟现实技术为核心的“Metaverse（元宇宙）”受到了Meta（脸书）、微软、英伟达、高通、腾讯、字节跳动、华为等公司的持续发力。脸书在2021年公布打造元宇宙的新计划，在公司VR实验室团队下成立元宇宙团队，持续在VR/AR以及其他元宇宙相关领域进行产品服务研发。Rolbox、Epic等美国公司加大了对元宇宙的投入。作为新一代信息技术融合创新的典型领域，虚拟现实关键技术日渐成熟，在大众消费和垂直行业中应用前景广阔，产业发展正逢其时。

虚拟现实通过硬件设备模拟和接受用户的感官信息，例如使用头盔的镜头模拟视觉，使用摄像头识别用户的手势，使用手环收集用户的肌肉信号，营造真实环境中的声音，视觉，触觉，让用户有身临其境之感。虚拟现实 (VR) 是一种计算机生成的环境，其中的场景和对象看起来真实，但都是在人的感觉意义上的真实而不是物理意义上的真实存在。未来虚拟现实将有可能成为信息时代新的信息传播媒介，深刻改变人与人之间的信息交互方式。

2021年10月28日Facebook正式改名为Metaverse，聚焦于虚拟现实，掀起了媒体的广泛关注，VR再次进入大众社会的眼帘，同时VR也成为投资者的下一个风口。随着软硬件技术的不断积累，现如今，构造普通大众使用的VR平台成为可能。2010年至2020年间，大量的物理设备诞生，从PC连接的头显（例如HTC Vive）发展到控制台连接头显（例如索尼的 PSVR）和移动设备。无线头盔（例如Oculus Go、联想Mirage Solo和HTC Vive Focus）于2018年问世，使VR成为一个独立平台。Teslasuit使用全身套装提供触觉反馈，增强用户的沉浸感，还提供了生物识别传感器，可以测量用户的心跳、汗水和其他指标，目前已经用于美国宇航员的训练之中。越来越多的传感器的使用帮助用户模拟生理上的感觉。同时，5G网络的发展也许能够解决实现云上VR的难题。

现如今，VR技术已经在教育、培训、游戏、工作、通信等领域得到初步应用。未来VR 与教育结合使得学生能够远程沉浸式学习，促进优秀教育资源的分配。对于培训，VR可以用来安全地模拟任何数量的危险环境，并监控我们对它们的反应方式。除了培训我们应对危险情况外，它还将大大降低让学生和缺乏经验的新员工在任何行业使用昂贵的工具和机械的财务风险。同时，受到疫情的影响，大量员工转向在线工作。VR能够为员工提供一个虚拟的工作环境和氛围。在通信领域，已经有许多基于 VR 的社交平台允许朋友或陌生人在虚拟环境中见面聊天或玩耍，例如VR Chat、Altspace VR和Rec Room。与其他领域的 VR 一样，由于新技术的发展，沉浸感水平的提高将使其在未来十年对主流观众更加有用和更具吸引力。总体而言，根据ARtillery Intelligence的研究，VR 商业设备的市场价值预计将从 2018 年的8.29亿美元增长到 2023 年的42.6亿美元。

虚拟现实中的对象操作（平移、旋转、缩放）是虚拟现实的基本问题之一，绝大多数可交互的虚拟场景中都需要对对象进行操作，例如：拉开一个抽屉，拧一个螺丝、打开一扇门、搬一个物体到另一个地方等。对象操作方法的效率和准确性直接影响用户体验和应用程序的第一印象。 许多研究人员提出了有效且准确的方法来处理虚拟现实中的对象操作。Go-Go、CAVE、ISAAC、WIM和HOMER等都是具有3D输入的虚拟对象操作技术的产物。

协同操作是指多个用户在一个场景中相互配合、共同完成某个任务。协同操作也有广泛的应用场景，特别是在如今疫情的大背景下，人与人不能近距离接触，需要用户远程进行交流协作，拥有VR场景能够方便不少。但是在协同操作中，如何帮助用户找到更好的操作位置是主要难点之一。一个用户在一个位置可能觉得操作是正确的，但是在另一操作位置上未必是准确的，比较这些视点的差别并给出最优视点能够帮助用户极大改善操作的效率。

为此本文提出了基于操作场引导的虚拟对象协同操作方法，通过构建操作引导场引导用户前往更加高效的操作位置。

## 1.2 研究目标

在虚拟现实中操作对象时，场景中往往有一些更合适的操作视点，可以清楚地观察到要操作的对象和目标位置，使用户可以更高效、更准确地操作对象。如何指导用户去到场景中视点质量更好的位置是十分重要的。本文主要有以下四个目标：

1、操作导航场视点采样：该研究主要目标为在用户的可行走区域上构建初始化场，其中采样的的数量和位置决定了整个场对用户引导作用的优劣。采样点数量较多会导致帧率下降，从而导致用户体验下降。采样点数量过少，将导致对用户操作的引导作用有限。采样点的位置也决定了操作过程引导的优劣。主要难点为可行走区域的划分和处理，采样点的优化以及帧率的优化

2、实时更新TRS操作导航场：构造平移度量T、旋转度量R、缩放度量S函数，分别用于表示某个采样点对于平移操作、旋转操作、缩放操作的视点度量。主要难点是合理的TRS度量函数的构造。

3、操作导航TRS场的可视化与引导方式的设计：将每个采样点根据其所对应的平移度量T、旋转度量R、缩放度量S可视化，并对用户有指导作用。对于协同操作来说，不同的用户可能拥有不同的操作权限，因此对操作引导场的可视化需要根据用户所拥有的不同操作权限可视化。主要难点为有效的可视化和引导方式的设计。

4、设计用户实验：为了验证我们引导场的有效性，我们需要设计用户实验与没有引导场的方法做出比较。主要难点为实验设计、数据分析和处理、结论分析和总结。

## 1.3 研究内容

为了找到场景中更适合操作的视点，本文提出了一个基于操作场引导的虚拟对象协同操作方法。我们通过在虚拟场景中的可行走区域进行采样和优化形成实时协同操作多人TRS场的视点位置，建立TRS三个分量的度量函数，并在TRS场的每个视点进行更新，通过实时更新的引导场的TRS值进行可视化，指导多个用户在虚拟场景中实现高效的对象操作。主要研究内容如下。

本文使用Unity导航网格系统划分可行走区域，并在可行走区域上进行采样，使用两遍预处理策略对采样点进行优化并使用批处理策略对帧率进行优化，并将预处理的结果导出，减少预处理消耗的时间。

本文基于虚拟场景结构、操作对象和目标构建了一个协同对象操作引导场，其中包含平移度量T，旋转度量R和缩放度量S三个部分。每个度量都与遮挡因子和三元组(d，，p)有关。

本文总共提出了三种可视化方式来可视化构造的协同对象操作引导场，分别为：小球引导、小地图引导以及地面色块引导。并设计了颜色插值方法，满足了多用户协同时的可视化颜色设计。

本文设计了一个用户实验：两个用户在一个场景中系统将一个物体移动到指定位置，同时调整缩放大小以及物体的姿态。其中一个用户只负责平移操作(对应单用户单操作权限)，另一个用户负责旋转和缩放操作(对应单用户多操作权限)。我们总共使用了三个场景，每个场景使用三种不同的可视化方式以及不同可视化方式的组合方式（实验组）和没有可视化方式（对照组）进行实验。与没有引导场的方法相比，我们的三种引导方式在执行效率和平移、旋转及缩放操作的准确性上有显著性效果提升。其中，地面色块引导方式是用户最为喜欢的。

我们的主要贡献如下：

1. 我们提出了协同对象操作引导场的概念。
2. 我们首先提出了一种基于操作引导场的协同对象操作方法。
3. 我们设计了一个用户实验来评估操作引导场的有效性。

## 1.4 论文组织结构

本文主要分四个章节来介绍基于操作场引导的虚拟对象协同操作方法的实现的相关内容。

第一章介绍了虚拟现实协同操作引导场的背景和意义，同时对研究目标和本文的主要研究内容和主要贡献做了阐述。最后对文章的组织结构做了说明。

第二章介绍虚拟现实操作的相关工作。分别阐述了现有单人操作、多人操作以及场的研究。并对一些方法的优缺点进行了分析。

第三章介绍了构造虚拟现实协同操作引导场的具体方法，主要包括操作场的初始化，操作场TRS的度量以及操作场的可视化，以及对每种方法的具体实现细节做了阐述。最后，本文一共提出了三种可视化方式：小球引导、小地图引导和地面色块引导。

第四章介绍了我们所做的用户实验。为了验证可视化方式的有效性，在实验中设置了六组实验(一个对照组和五个实验组)，对照组不适用导航场，实验组一使用小球引导，实验组二使用小地图引导，实验组三使用地面色块引导，实验组四使用小球加小地图引导，实验组五使用地面色块加小地图引导。分别统计用户操作的时间以及平移、旋转、缩放的误差，通过假设检验方法对数据进行分析，最后得出有效结论。

最后是结论和展望，总结了本文章方法的不足之处以及对不足之处的后续弥补工作。

# 国内外研究现状

## 2.1 对象操作

操纵是改变选定对象的特征的任务[1]。例如，它可以被认为是空间变换的应用；视觉属性颜色和纹理的变化，甚至自由变形。然而，操纵最常指的是空间变换[1][2]。

存在几种不同类型的空间变换：平移、旋转、缩放、剪切和反射等。尽管有研究工作涵盖了虚拟环境中的所有这些变换，但最常见的变换是平移和旋转，它们是很多任务所必需的。这些变换也是与日常物理交互最相似的变换。尽管如此，自开创性作品[3][4]以来，缩放已与这两个基本操纵组合在一起。这三个变换与选择一起被确定为基本操纵任务，已在大量其他研究工作中保持在一起。

这些变换中的每一个都可以应用于三个不同的轴（x、y、z）。这些轴之一上的单个变换通常称为自由度 (DOF)。因此，对于允许在所有这些轴上进行所有变换的系统，可以说它允许在9个自由度上进行变换。对于仅提供3D平移和旋转的系统，它们支持 6个自由度，而对于那些添加到这种统一缩放的系统，它们支持7个自由度。DOF还用于指设备的跟踪能力。例如，鼠标可以跟踪平面（2D）中的位置变化，因此，它是一个2-DOF设备；一个空间杆，如果其在空间(3D)中的位置、俯仰、滚动和偏航被跟踪，则是一个 6 自由度设备。

通过将用户的输入映射到对被操纵对象执行的操纵来启用变换。一些研究人员研究通过物理模拟或使用例如手势识别对特定交互行为进行预编程来执行。首先，用户输入可以映射到物理模拟中虚拟代理的摩擦和碰撞引起的接触力，从而实现基于手的紧急手势[5][6]。例如，清扫、铲起、提升和投掷虚拟对象。然而传统交互的某些方面并不自然地适合物理实现。例如，动态缩放对象不能通过刚体模拟来实现。因此，另一些研究人员专注于预编程交互，其中输入自由度显式映射到操纵对象变换自由度。输入自由度可以是通过跟踪 3D 中的位置和方向得出，但它们也可以是通过其他输入通道（按钮、轨迹球和等渗和弹性传感器）获得的用户动作的测量值[7]。

要将用户的输入映射到变换，可以遵循一下几种方法。精确的操纵将直接跟踪的设备或手的空间变换映射到虚拟对象变换上。换句话说，即使跟踪的输入和虚拟对象具有固定的偏移量，它仍提供1:1的控制。如果跟踪的手/设备与虚拟手/设备位于同一位置，则效果是对真实世界操纵的模拟。输入的选定平移或方向自由度也可以直接映射到虚拟世界的自由度上。其他方法使用线性或非线性缩放变换来提高精度或分别通过 N:1 或 1:N 控件获得更大范围的变换参数。

为了克服由于物理约束而造成的限制，允许使用 2D 跟踪进行3D操纵或在具有更高输入自由度时限制操纵的自由度，许多技术依赖于间接映射。这些映射将跟踪的自由度映射到不同的操纵自由度（例如，滑块控制旋转、虚拟小部件应用限制或对象外部的特定手势以触发额外的变换）或使用不同的输入通道来控制对象变换自由度（例如鼠标、键盘、操纵杆、麦克风等等）。这种重新映射过程可能涉及“学习一种感觉运动映射，它在虚拟世界中产生与现实世界所期望的结果不同的结果”，这可能是开发操纵技术中最关键的设计问题，因为它很难为不同的操作场景找到最佳解决方案。映射应允许用户利用现有的或易于学习的运动程序[8]，使交互有效、易于学习和易于使用。这个结果通常是通过使用隐喻来搜索的。

但是，有一些技术可以将不同的映射应用到相同转换的不同 DOF，例如，精确 1:1 控制 DOF 的子集，并通过小部件重新映射其他 DOF。 我们将这些转换映射定义为混合操作。

使用精确映射的直接操纵并不总是最好的解决方案，特别是在追求最大精度或我们想要允许大的平移、旋转和缩放时。在沉浸式 VE 中通常需要精确映射，但即使在这样的环境中，将不同的跟踪运动或按钮或操纵杆上的动作重新映射到对象变换上也是完全可以接受的。这是现代 VR 游戏中的典型解决方案。

对于缩放，由于这种变换在物理上是不可能的，因此不存在精确的映射，最常见的是距离映射。这种映射采用“拉伸一块橡胶”[9]的比喻，利用两个输入点之间距离的变化。这种映射是很久以前提出的[10]并且随着支持触摸的移动设备的出现而在公众中流行起来。现在已经存在执行缩放变换的不同方法，不同方法主要区别在于以不同的方式重新映射输入。

## 2.2 单人操作

在虚拟现实用户交互中，物体操作是最基本的交互方式之一。其中最自然的操作方式是用户直接使用手对物体进行操作。现如今，有两种常用方式能够让用户直接用手操作物体。一种是由Wang等人[11]提出的直接用手的移动来映射物体的移动的操作方式。这种方式与人在真实世界中操作物体的感受是一致的，物体移动多少距离，人的手就需要移动多少距离，物体旋转多少角度，人的手就需要旋转多少角度。但这种操作方式在被移动的物体所要移动的距离较远的情况下，对于人的体力要求较高，容易引起人的不适感。另一种方式是由Mendes等人[12]提出的增加约束的方式。Mendes提出在移动物体时，将物体移动的某个轴固定并可视化，用户只能对物体沿着某个固定的轴进行移动。这种方法的有点是只需沿着一个轴移动，对用户来说比较方便，但是用户对于轴的确定并不是十分的敏感。除此之外，Nguyen等人[13]提出通过三个操作点的重心来操作物体。其中，用户通过三个操作点对对象进行精细操作，通过控制重心对对象进行粗略操作，这种分粗操作和精细操作的方法在一定程度上提升了操作的效率。同时，他们[14]还提出了7-Handle操作技术，通过生成具有多个点的小部件来操作对象，但这种方法操作起来较为复杂，对于简单场景并不适用。Gloumeau等人[15]提出了PinNPivot操作方法，可以将被选中物体上的任意一点作为一个固定点，同时被选中物体上的任意两点能够连成一个轴作为操作物体的约束轴，该方法通过物体上的参考点帮助用户选择敏感轴，但是对于一些没有可以参考的点的物体（例如无差别的球体），用户操作起来依旧不方便。虽然这些方法在一定程度上提高了操作效率，但是这些方法都要求用户直接接触到物体，在当场景中有物理障碍物或者时跟踪距离有限时，用户很难到达被操作的物体，此时提高物体操作的准确性变成了一个挑战。

为了解决这个问题，许多人提出了解决方法。Poupyrev[16]提出了Go-Go方法，通过延伸的手臂的距离非线性映射物体移动的距离来操作远处的物体，Go-Go方法很大程度上提升了远距离操作物体的效率，但是如何确定映射比例依旧是具有重要意义的问题。Ray Casting是另一种在VR领域允许用户操作远处物体的方法，这种方法比Go-Go更加有效，通过光线选中物体，进入编辑模式，编辑后退出编辑模式修改被操作物体的位置信息。HOMER[17]是一种扩展的投影技术，用于以手为中心的物体操作，其中用户通过Ray Casting抓住对象，虚拟手移动到对象位置进行操作，但是这种方法对于处于远距离，看不清的物体的操作并不方便。

为了改善效率和准确性，Frees等人[18]提出了PRSIM方法，据手的速度将用户的状态分为两种模式。当用户处于精确模式时，通过增加控制/显示 (CD) 比率，使对象平移和旋转的速度比用户的手慢。在另一种模式中，用户属于正常模式，在这种模式下，每次他们的手移动，对象移动相等的距离，该方法通过调节CD比率的方法解决了远距离移动物体耗费体力的问题。Wilkes等人[19]融合了PRISM方法和HOMER方法，提出了Scaled HOMER方法，使其更适合更高精度的长程和短程操纵任务，而不会减慢速度。Noritaka[20]在PRISM的基础上提出了位置调整和视点调整两种调整方法。当用户使用一只手时，两种调节方式中的系数是根据用户手的速度来确定的。当用户使用双手时，该因素由双手之间的距离决定。Kim[21]提出了一种基于计算机视觉的非线性映射方法。该方法通过手的平移和旋转的速度和加速度来确定组合系数。这种方法中被操纵物体的平移和旋转速度总是大于或等于手的速度。但是，当操纵物体非常靠近物体时，操纵物体的运动和旋转的速度不能低于手的速度。Kim等人[22]根据输入设备的移动和旋转速度动态调整虚拟现实 3D 用户界面 (3DUI) 中的移动和旋转增益，并具有解剖学 2D/3D 形状匹配。总之，以上方法都是利用用户手的速度来判断操纵对象的速度是否大于手的速度。但是，很明显，当被操纵物体非常接近目标位置时，上述方法都不能兼顾用户对物体操纵速度的所有要求。同时，用户也无法提高操纵物体的scale精度。现在也有一些学者正在研究构造自适应增益的方法。

## 2.3 多人协同操作

单人操作中用户只拥有一个视点，使得用户所获得的信息量有限，在操作过程中对物体的远近不能很好把握，可能导致操作物体的效率变低以及准确率下降。因此越来越多的人致力于研究多人协同操作，多人协同操作既是一个VR领域的典型应用场景，也是解决单用户操作中的问题的方案。Pinho等人[23]提出了的多用户协同操作的框架，这一框架将用户操作自由度分离，并且用户操作的自由度在事先都指定分配好，这种方法不支持用户更换操作自由度，如果用户的位置初始化在不好的操作视点，则操作起来较为费力。Ruddle等人[24]研究了不分操作自由度时，多个用户协同操作产生冲突的场景。当多个用户操作产生冲突时，例如一个用户将物体左移1m，另一个用户将物体右移1m，Rudlle对这种情况要么使用两个用户操作的平均值或者两个操作的公共部分来作为最终的操作结果。这种方法没有固定自由度，能够在一定程度上加快操作速度，但是在精度上依然有不足之处。Riege等人[25]提出了一种多用户协作操作指向技术，使用弯曲的拾取光线为用户提供连续的视觉反馈，让用户了解协作操作的过程。Duval等人[26]提出了一种多个用户使用平移动作操作物体的方法，每个用户在对象上选择一个操作点，多个用户通过移动其相应的操作点来更改操作对象的位置和方向，该方法能够降低用户的操作自由度，每个用户只需平移即可。

在多用户协同工作中，不同用户的角色分配是一个重要的研究内容之一。Soares等人[27]将用户的操作自由度根据用户到被操作物体的距离分配给不同的用户。Chenechal等人[28]提出了一种四个用户协同操作的方法，不同的视点根据每个用户的角色分配给用户。第一个用户负责平移，该用户拥有全局视角。第二个用户负责缩放和平移，操作物体的内部。第三个用户帮助第二个用户缩放物体。第四个用户观察前三个用户的视点，帮助这三个用户沟通。Grandi[29]比较了用户佩戴不同设备时的协同操作：(1)两个用户都在VR端；(2)两个用户都在AR端；(3)一个用户在AR，另一个用户在VR端。Lages[30]提出了光线相机方法，导演角色可以将不同的操作自由度按照每个用户的视点分配给不同的用户。Baron[31]提出了多用户协同操作的UI分配，通过同步机制和视觉反馈减少沟通需求。Wang等人[32]提出了通过视觉度量将用户的操作自由度自动的分配给用户。目前主要研究内容为如何自适应地为用户分配不同角色。

## 2.4 人工势场

为了解决移动机器人的运动规划问题，Khatlib[33][34]提出了人工势场的概念，它是与障碍物相关的回避向量和与目标相关的吸引向量之和，通过人工势场能够不断生成适应条件变化的动态轨迹。Pati[35]提出了一种新方法，使用导航场来引导和控制虚拟人群。这一方法解决了在仿真中引导人群流和在运行时交互控制仿真的问题，这一方法利用更高层次的目标计算每个人的目标位置，同时这一位置能够动态改变。Bachmann[36]在重定向行走（RDW）中引入了一个人工势场，根据该势场，用户被“推”离障碍物和其他用户。然而，该方法没有考虑用户在物理空间中的合理转向目标。因此，Dong等人[37]提出了一种使用人工势场的多用户重定向行走的新方法。除了使用用户与用户以及用户与障碍物之间的排斥力，他们还使用重力引导用户走向开放区域。Messinger[38]提出了修改版的ARF-RDW算法，使其能够在不规则凹面跟踪区域支持多用户。Freitag[39]研究在大型场景游览中，使用该用户的视点质量来加快用户游览速度。之后他们[40]给出了使用视点质量的辅助交互界面，提示用户场景中的敏感部分。在有目标物体的操作场景中，还可以使用目标物体的信息来帮助用户加快操作效率。Wang等人[32]已经提出使用户当前视点中的环境对物体的遮挡以及物体对目标的遮挡构建视点质量的函数工作。通过构建视点质量度量在多人协同操作的场景中自动决策当前位置由哪个用户进行物体操作。

现有的方法没有基于整个场景去考虑最适合用户操作的操作视点，也没有引导用户去选择最优的操作视点。我们的方法根据场景的结构、被操作的物体和操作的目标位置去采样并生成操作引导场。这个场中的采样点在用户操作的过程中实时更新，同时我们对整个场进行了可视化，为用户提供较优的操作视点参考。我们的方法中操作方法使用的是光线投射的方法，同时结合视点质量工作[32]构造相对应的TRS度量。

# 基于操作场引导的虚拟对象协同操作方法的设计与实现

本文使用Unity进行项目开发和场景搭建，我们使用到了Unity的导航系统划分可行走区域，该导航系统允许用户配置场景中的几何体，创建导航网格以及能够在游戏世界中自由移动的角色，同时还支持动态生成导航网格，允许用户在运行时更新导航网格，一般用于游戏中生成AI。我们还使用了SteamVR实现本文中用户的操作方法，SteamVR是Valve公司维护的一个插件，使用SteamVR使得在Unity中进行VR项目的开发更加便捷。SteamVR主要负责帮助用户追踪不同物理设备，处理不同控制器的输入，同时还实现了许多常用的交互示例。使用Sokcet进行多用户之间的信息同步，TRS场的计算只在服务器端进行，服务器计算之后将信息同步到客户端。为防止两端帧率不同步导致的客户端处理不及时问题，我们对客户端进行了帧率同步。除此之外，我们还使用Compute Shader加速TRS的计算，Compute Shader是在GPU上运行的着色器程序，处于正常的渲染管道之外。它可以用于大规模并行GPU算法，而在我们的项目中，需要同时计算多个操作视点的TRS值，因此使用GPU加速能够取得显著效果。以下为我们方法的具体实现细节。

## 3.1 操作场的初始化

视点质量场构建在用户可行走区域之上。只有在用户可行走区域上构建场，因此首先要对场景中用户可行走区域进行划分，对用户来说这个场才是有效场。我们首先使用Unity中的NavMesh系统，将地面划分为可行走区域和将地面上的物体划为不可行走区域，利用该系统生成导航网格NavMesh。工厂场景下生成的导航网格如图 3.1中蓝色部分所示。由NavMesh系统导出可行走区域的坐标，导出生成.obj格式文件如图 3.2所示，可行走区域为不规则形状，由不同的三角形面片组成，构成.obj格式文件中的顶点和索引。

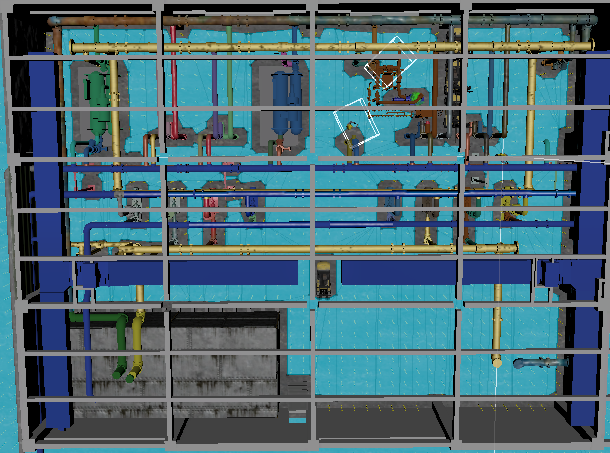


图 3.1 工厂场景下生成的NavMesh

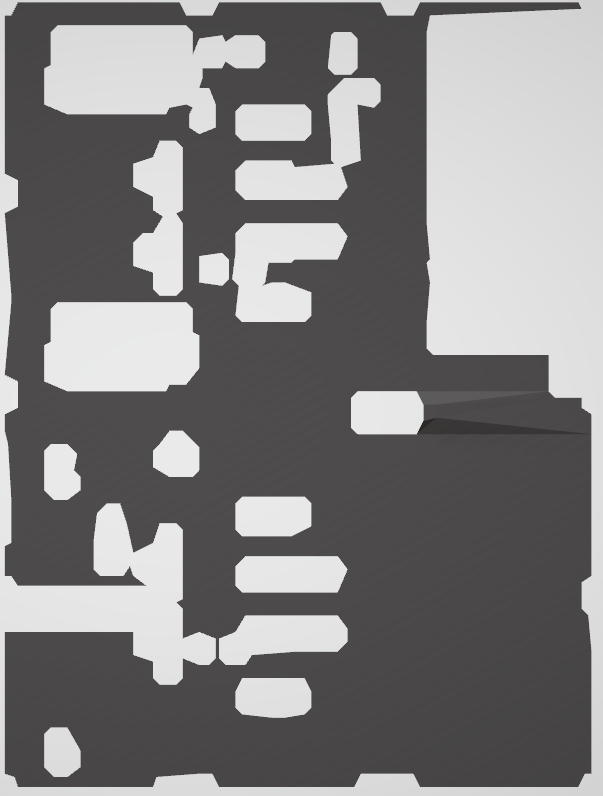


图 3.2 工厂场景下导出的NavMesh的.obj文件

获取可行走区域的数据点后，遍历所有的点找出可行走区域的边界，从边界处开始进行采样，每个采样点之间的间隔为延x轴和z轴距离为1.5m(对应人的臂展)，延y轴为指定高度1m(对应于人蹲下的姿势)和1.7m(对应人正常站立的姿势)。遍历每个采样点的同时，计算其水平投影位置是否处于可行走区域中的某个三角形面片之中，如果在则保留该采样点。

在可行走区域中生成的采样点中，有一些点在用户操作物体的整个过程中可能都不会使用到，例如：有一些点的视角被其他物体遮挡，在使用过程中任何时刻都不能看到整个物体和目标或者有一些点离得较远看不清物体和目标等问题。并且当场景非常大的时候，采样点数目会上千，采样点全部使用将导致后续场中数据更新不能实时，从而导致帧率下降甚至导致程序崩溃。因此我们需要通过预处理操作对场景采样后的点做筛选，删去一些不必要的点。

为了方便计算，我们构建了一个Unity Prefab，该Prefab主要功能为设置相机朝向某个位置，绘制出视图并计算更新某个位置的视点质量。该Prefab内部含有三个相机，第一个相机只绘制物体，第二个相机只绘制目标，第三个相机绘制整个场景。通过ComputerShader计算三个相机绘制后的视图中物体的像素大小S\_Object，以及目标的像素大小S\_Target。

在预处理阶段，我们使用一个Prefab每隔0.1s遍历访问每个采样点，设置Prefab的朝向为物体初始位置和目标位置的中点，该Prefab对该采样点的视图(分辨率为32\*26)进行绘制，并计算出目标位置的可见像素S\_Target以及被操作物体的可见像素S\_Object。最后通过设置阈值将S\_Target和S\_Object过低的采样点删除。

为了防止出现两物体之间的距离较远，设置Prefab的朝向为物体初始位置和目标位置的中点可能不能看到两个物体，但是这个点依然有可能在操作过程中起到重要作用。为了解决这一问题，我们采用了两遍预处理策略。如果物体初始位置和目标位置的距离足够近，那么采用一遍预处理策略。在第一遍预处理中使相机朝向物体初始位置和目标位置的中点即可满足需求。如果距离远，则增加一轮预处理。在第二遍预处理中使相机朝向物体目标位置，为第一次预处理补充一批靠近目标位置的点。通常第一次预处理是使用的阈值较小，使得本次预处理保留能够同时看到物体和目标的点，用于用户选择较好的视点初始位置。第二次预处理使用较大的阈值，筛选出以目标位置为中心的点，当用户操作物体靠近目标位置时，可以使用第二批预处理的点来指引用户操作。

在工厂场景中，如果物体初始位置和目标位置的距离大于3，则使用两边预处理策略。在第一遍预处理过程中，设置S\_Target和S\_Object的阈值为5和5，如果S\_Target和S\_Object都大于5，则将这个点保留。在第二遍预处理过程中，设置S\_Target的阈值为10，如果S\_Target的阈值大于10，则将这个点保留。每个采样点只需要满足第一遍或第二遍预处理则可以被保留。如果物体初始位置和目标位置的距离小于3，则采用一遍预处理策略。所有相机朝向物体初始位置和目标位置的中点，设置S\_Target和S\_Object的阈值为10和10，如果S\_Target和S\_Object都大于10，则将这个点保留。在所有场景中，距离以及阈值都是可以调整的，用户需以场景的大小以及物体的实际操作需求为准。阈值的设置与被操作的物体的大小有关，我们通过调参实验(保证采样点在100左右)对用户设置阈值与物体大小的关系做了研究，结果如图 3.3所示。用户可参考该图对自身的场景阈值进行设置。

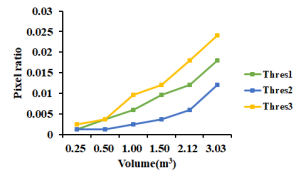


图 3.3不同阈值与被操作物体体积大小的关系(供用户参考设置阈值)

即使通过设置阈值将所有的采样点筛选到约100个采样点，依然在实时更新操作引导场的时候不能够满足帧率要求。我们测试的数据显示，25个采样点同时运行时帧率能够达到30fps。因此为了保证帧率高于30fps，我们采用了分批处理的技术。我们调整一帧所使用的采样点数量，使用批处理的方法，每一批处理更新25个采样点的TRS度量。在30fps的情况下，基本能够保证0.2s更新一次操作场的度量。

最后，对于较大的场景，预处理耗费的时间可能比较长，因此我们将采样后的点导出为文件。同样的场景只需要完成一次预处理即可，下次使用该场景时直接加载采样点文件即可。

## 3.2 操作场TRS的计算

如何度量给定场景的操作场中的操作点是否适合操作对于本问题非常重要。本文基于操作场中操作视点下被操作对象与目标之间的距离、角度和投影面积比例关系，可以确定操作场中哪个操作视点更适合旋转，哪个操作视点更适合移动，哪个操作视点更适合缩放。此外，本文还考虑了场景对对象和目标的遮挡，以及对象对目标的遮挡。TRS度量函数䣌定义需要满足以下条件：在操作场的某个操作视点的视图中，场景对对象和目标的遮挡以及对象对目标的遮挡越多，该视点越不适合用作平移、旋转和缩放。场景对对象的遮挡导致用户不能够找到被操作物体，场景对目标的遮挡导致用户不能即使对对象进行操作。对象对目标的遮挡越多，表明目前操作越接近真实位置，用户需要对对象进行精细操作，此时是较难完成的。而遮挡较少的点则对象与目标的位置差异比较明显，更适合用户操作。具体计算方法将在下文所示。

我们首先在操作场的操作视角下测量被操作物体与目标之间的距离、角度和投影面积比例的关系。我们将其定义为一个三元组(d，，p)，其中d，θ和p是距离度量，角度差度量，以及操作对象和目标的投影面积比，算法如表 3.1所示。

表 3.1 Object-target视觉度量算法

|  |
| --- |
| **Algorithm 1** Object-target relationship metric |
| **Input:** object o, target t, viewpoint V, view I  **Output:** distance d, angle θ, area proportion p  1: Ao,At = Area(I,o,t);  2: p = Ao/At ;  3: bo,bt = OBB(V,o,t);  4: co, ct = GetOBBCenter(bo,bt);  5: lo,lt = GetOBBAxis(bo,bt);  6: d = Distance(co, ct);  7: θ = GetAngle(lo,lt);  8: **return** (d,θ, p); |

该算法的输入是操作对象o和目标t的几何体、当前视点V和从V渲染的视图I,输出是三元组(d，，p)。首先，我们计算操作对象和目标的投影面积，以及投影面积的比值p（第1-2行）。在此之后，我们从V绘制对象和目标，并在视图中构造包围盒（OBBs）（第3行）。获得OBB的中心和长轴（第4-5行）。之后计算对象和操作场操作视点目标之间的距离和角度差（第7-8行）。最后，得到物体与目标之间的距离d和角度差，并返回投影面积比p（第8行）。

然后计算遮挡因子，如公式(3.1)所示。基于场景对目标和对象的遮挡，以及对象对目标的遮挡。因子在等式1中计算，其中是当前操作视点下目标和操作对象之间虚拟场景遮挡的面积之和，是当前操作视角下目标的总面积，是当前操作视点下目标物体被被操作物体遮挡的区域。满足场景对目标和对象的遮挡越大，或者对象对目标的遮挡越大，的值越小。

公式(3.1)

操作场的T由三元组(d，，p)的d和组合而成，如公式(3.2)所示，其中设为0.7，设为0.3，W设为32，H设为26。操作场的R由三元组(d，，p)的θ和组合而成，如公式(3.3)所示，其中设为0.5，设为0.5。操作场的S由三元组(d，，p)的p和组合而成，如公式(3.4)所示，其中设为0.4，设为0.6。在用户操作过程中，我们实时计算了操作场中每个操作视点的T、R和S。

公式(3.2)

公式(3.3)

公式(3.4)

不难发现的值域位于(0,1)之间，、、也位于(0,1)之间。因此两项的加权平均将使得T、R、S的值位于(0,1)之间，后续进行可视化处理，便利用了这一性质。且T满足两物体距离d越大，遮挡因子越小，T的值越大。R满足两物体之间的角度插越大，遮挡因子越小,R的值越大。S满足投影比例p越大，遮挡因子越小，S的值越大。因此满足T、R、S的值越大，该视点越适合用户操作的要求。

## 3.3 操作场的可视化

为了在用户操作过程中方便用户在场景中找到更好的操作位置，需要将操作场中每个操作位置进行可视化。我们总共设计了三种可视化方法，分别用于用户的不同场景使用。

第一种方法是使用小球引导，将每个采样点直接用有色小球进行可视化，该方法主要优点是能够可视化所有的预处理后的采样点，能够帮助用户在垂直位置找到更好的操作点。缺点是用户前方的采样点有可能遮挡用户的操作视角，影响用户的操作体验。

第二种方法是地面色块引导，将采样点中垂直位置相同的两个点的最大值可视化到地面的垂直投影位置，并用一个有色的1m×1m的平面进行可视化。该方法解决了采样点对用户视角遮挡的问题，但是丢失了垂直方向的信息。尽管丢失了垂直方向的信息，但是对用户的使用影响不大，我们通过实验发现用户能够根据自己的意识找到垂直方向的较好视点。

第三种方法是小地图引导，在小地图中将地面色块可视化出来，而实际场景中不可视化地面色块。该方法不会像上述两种方法一样破坏原有场景。在实现过程中我们发现常规的小地图方式在VR中使用并不理想，一方面小地图较小，用户想要看清小地图比较吃力，另一方面为了避免小地图遮挡场景，我们将小地图位于用户视角的右上方，因此用户需要将眼睛盯着右上方才能看清，用户使用起来比较费力且体验较差。为了解决这一问题，我们增加了用户长按手柄按键将小地图放大和松手小地图缩小的功能。这种方法的优点是能够提供给用户较好的全局视角，且很直观的帮助用户找到起始操作位置。

对于地面色块以及小球颜色，我们使用了红色(记作c1)到黄色(记作c2)的插值。我们计算的T、R、S值处于(0,1)之间，使用)来计算可视化的颜色。对于单用户单操作权限，例如本文中的一个用户负责平移，则直接使用T做插值即可。对于单用户多操作权限，例如本文中的一个用户同时负责旋转和缩放，则将R与S加权平均后做插值即可。对于用户来说，越偏向黄色的点，视点越好，操作起来越方便，越偏向红色的点，视点越差。最终结果如图 3.4所示。

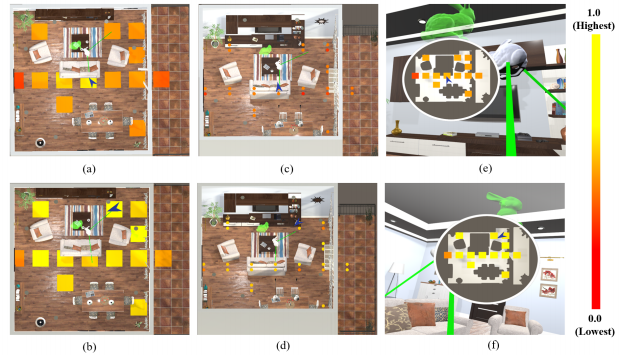


图 3.4 客厅场景中MGF的三种可视化方法。上方一行为负责平移的用户，下方一排为负责旋转和缩放的用户。每行从左到右依次为地面色块可视化、小球可视化、小地图可视化。对于用户来说，越黄色的点越方便操作。

## 3.4 本章小结

本章主要介绍基于操作场引导的虚拟对象协同操作方法的具体实现细节，主要介绍了以下三个部分：

第一节介绍了操作场的初始化，首先使用UnityNavMesh系统对场景进行处理烘焙出可行走区域，导出可行走区域的坐标并在其上以水平距离1.5m×1.5m，垂直取1m和1.7m进行间隔采样。为了删去一些不必要的点，对采样后的点使用两遍预处理策略进行优化。同时为了提高帧率，使用每次处理25个采样点的方法，使用户处理过程中能够保证30fps。最后将优化后的采样点坐标导出为文件，方便下次直接使用。

第二节介绍了操作场中每个操作视点的平移度量T、旋转度量R、缩放度量S的计算方式。T、R、S的值主要与遮挡因子和三元组(d，，p)有关。遮挡因子主要考虑环境对物体的遮挡、目标的遮挡和物体对目标的遮挡。三元组(d，，p)使用对该采样点绘制的视图中的物体和被操作物体生成的包围盒进行计算。T、R、S的值处于0和1之间，值越大，在该操作点处的操作越方便。

第三节介绍了操作场中每个操作视点的可视化方式，主要为小球引导、小地图引导和地面色块引导，并分析了每种方法的优劣势。小球和地面色块的颜色使用红色到黄色的插值来计算，插值因子为与该用户所拥有的操作权限相对应的操作度量的加权平均。对于用户来说，越偏黄色的点越方便用户操作。

# 用户实验及结果分析

## 4.1 实验设计

为了验证我们方法的有效性，我们实验使用了三个场景，每个场景使用六种方法进行实验，以下将对实验具体细节进行介绍。我们总共招募了36名志愿者，其中男性为30名和女性为6名，他们的年龄在20至31岁之间。其中24名志愿者之前有过虚拟现实体验。志愿者的矫正后视力正常，没有人报告视力或身体障碍。同时，我们使用的实验环境如表 4.1所示：

表 4.1 实验环境

|  |  |
| --- | --- |
| VR硬件设备 | HTC Cosmos VR HMD系统和两个手持控制器 |
| 显卡 | NVIDIA GeForce GTX 3090 |
| CPU | 3.6GHz Intel（R）Core（TM）i7-9900KF |
| RAM内存 | 16GB |
| 所跟踪物理空间 | 4m×4m |
| 软件版本 | Unity 2019.1 |

### 4.1.1 操作方法

在我们的实验中，需要两名参与者协同完成，一个用户只负责平移，另一个用户负责旋转和缩放。平移、旋转和缩放操作方法使用了我们在上一篇文章[32]中实现的对象操作方法。当用户一直按住手柄上的“on”按钮后，用户手的平移和旋转将根据操作增益映射到虚拟物体的平移和旋转。用户可以重复该操作，将对象移开或缩放，或达到超出腕部限制的总旋转角度，例如，继续按下“on”按钮，移动手，释放按钮，手的位置回到原位置，然后重复上述过程将物体移动到很远的地方。

同时用户能够在场景中自由行走，这里我们使用了SteamVR中的Teleport来实现。用户只需要向前轻推遥感，用户眼前就会出现一条弧线。如果弧线为红色，则代表未于可行走区域产生相交。如果为绿色，则代表弧线的尽头与地面上可行走区域的交点即为用户即将前往的地方，用户松开遥感即可前往该地点。用户可以通过调整自身和手部的角度，调整弧线的角度，从而找到可行走区域，实现弧线从红色变为绿色的过程。

### 4.1.2 场景描述

我们的用户实验需要在3个场景中进行物体操作任务，以评估我们方法的效率、准确性和任务负载。

在Livingroom场景（S1）中，用户需要操作桌子上的一只兔子，将其对准目标位置（图4）。客厅场景的大小为8.4m×9.2m，目标立方体的大小为0.8m×0.79m×0.62m。Livingroom场景相对其他两个场景来说面积较小，使用该场景是为了测试我们的方法在小场景中的有效性和可用性。

在Warehouse场景（S2）中，用户需要操作佛像对准目标位置。Warehouse场景尺寸为16m×30m，目标尺寸约为0.47m×1.16m×0.47m。在Warehouse场景中有较多的货物架，货物加上摆满了货箱，不同排之间的货物和货物箱存在遮挡，使用该场景是为了测试我们的方法在有较多遮挡时的有效性和可用性，特别是对于小地图方法。

在Pipe场景（S3）中，用户需要操作一块蓝色零件到目标位置。Pipe场景尺寸为50m×60m（图1），目标尺寸约为2.4m×1.1m×0.8m。Pipe场景相对其他两个场景来说面积较大，使用该场景是为了测试我们的方法在大场景中的有效性和可用性。

我们对每个场景中对象和目标，都事先处理了六个不同的位置，这些位置对于用户来说操作难度基本相同，用户实验时直接使用对应场景的采样点配置文件。

### 4.1.3 实验方法

实验中每个场景有1个对照组(CC)和5个实验组(EC1-5)。对照组采用EGO-ECO方法[38]，其中负责旋转的用户不跟随对象。实验组一(EC1)使用小球引导，实验组二(EC2)使用小地图引导，实验组三(EC3)使用地面色块引导，实验组四(EC4)使用小球和小地图引导，实验组五(EC5)使用地面色块和小地图引导。

我们的方法为了帮助用户有效地操作目标。因此，我们提出以下假设：

假设1：与对照组(CC)相比，实验组(EC1-5)中用户可以更快地将对象操作到目标位置。同时，与实验组一到四(EC1-4)相比，实验组五(EC5)中用户可以更快地将对象操作到目标位置。

假设2：与对照组(CC)相比，实验组(EC1-5)中用户将对象操作到目标位置的准确率更高。同时，与实验组一到四(EC1-4)相比，实验组五(EC5)中用户可以更快地将对象操作到目标位置的准确率更高。

假设3：实验组一到五(EC1-5)的用户任务负载低于对照组(CC)。

在实验期间，用户需要尽可能快速、准确地将对象操作到预定义的目标位置。实验中有三个场景。每个场景中的目标都是固定的。被操作对象的大小是随机生成的，大约是目标大小的0.6-2倍。在初始化过程中，对象和用户的位置被放置在场景的随机位置。用户将对象操作到目标后，相继按“结束”按钮记录数据，完成任务。

对于对照组和实验组，两名参与者组成一个小组进行协作操作。所有用户按顺序执行所有的场景中的所有的实验组。不同场景之间的最小间隔为一天，最大间隔为三天。对于每个场景，我们会提供给参与者操作相关的知道信息以及足够时间进行训练。当两个用户指向被操作的物体时，场景中的线由蓝变绿，意味着系统开始记录数据以及用户可以开始操作。我们告诉参与者需要尽量使用我们提供的方法来提高操作的精度以及我们非常关注操作的时间，从而促使用户能够提高精度和加快时间。用户完成每个场景的实验后，填写对应的问卷，帮助我们完成数据的统计。

### 4.1.4 度量指标

我们主要统计以下四个客观度量指标：任务完成时间、位置误差、旋转误差以及比例误差，Teleport使用次数，地图使用次数和时间。任务完成时间、位置误差、旋转误差以及比例误差计算方法与文章[32]相同。在实验人员按下结束按钮后，计算并记录被操作物体和目标之间的各个维度的差异。同时我们使用了以下两个个问卷统计参与者的主观指标：标准NASA TLX问卷[41][42]以及Rank Score问卷。两个问卷分别用于统计用户的任务负荷和不同方法的排名。用户完成每个方法后填写标准NASA TLX问卷，做完所有实验以后完成Rank Score问卷。

对于每个指标，使用单向重复测量方差分析将EC值与CC1、CC2、CC3、CC4和CC5的值进行比较。首先，使用Shapiro-Wilk检验[45]验证了分布正态性的假设，我们所有的数据符合正态分布。然后使用Mauchly检验[46]评估球形假设。当违反球形假设时，将对数据进行Greenhouse-Geisser校正。然后进行总体方差分析，以调查是否可以拒绝零假设，即五种情况之间没有统计显著性差异。当零假设被拒绝（p<0.05）时，对之间的差异通过post-hoc检验进行分析，使用Bonferroni校正保守地降低显著性水平（α<0.016）。对于时间相关变量，我们还使用Cohen's d[47]量化了效应的大小。最后根据d值的大小划分为六个等级：巨大（d>2.0）、非常大（2.0>d>1.2）、大（1.2>d>0.8）、中等（0.8>d>0.5）、小（0.5>d>0.2）和非常小（0.2>d>0.01）的定性效应大小估计。所有分析内容使用SPSS软件。

## 4.2 实验结果分析

### 4.2.1客观度量

我们报告并讨论了以下四个客观度量指标和三个主观量指标的结果。

表 4.2给出了任务完成时间。 统计显著性用星号表示。S1和S2违反了球形假设：p < 0.001(S1), p < 0.001(S2)。 应用Greenhouse-Geisser校正后，总体方差分析揭示了五个实验组之间的显著性差异：S1 为 F2.374,66.469 = 45.801,P < 0.001，S2 为F5,135 = 8.378,P < 0.001。 S2符合球星假设：p = 0.264。 总体方差分析表明，S3 的这些实验组之间存在统计学上的显著差异：S3的F3.245,87.697 = 19.475,P < 0.001。 事后分析表明，对于所有场景，CC的任务完成时间显著高于 EC1、EC3、EC4 和 EC5。 与所有三个场景的对照组CC相比，EC1、EC3、EC4和EC5显著提高了任务时间性能，显著性效果的范围位于“中等”和“非常大”之间，EC2没有显著提高任务时间性能。

表 4.2 任务完成时间，以秒为单位

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 场景 | 方法 | Avg±std. dev. | (CCi-EC)/CCi | p | Cohen's d | Effect size |
| S1 | CC | 144.25±47.36 | - | - | - | - |
| EC1 | 84.78±16.82 | 70.2% | < 0.001∗ | 1.67 | Very Large |
| EC2 | 130.90±31.12 | 10.2% | 0.311 | 0.33 | Small |
| EC3 | 72.23±22.16 | 99.7% | < 0.001∗ | 1.95 | Very Large |
| EC4 | 88.70±22.16 | 62.6% | < 0.001∗ | 1.48 | Very Large |
| EC5 | 74.05±17.54 | 94.8% | < 0.001∗ | 1.97 | Very Large |
| S2 | CC | 114.90±32.51 | - | - | - | - |
| EC1 | 95*.*30*±*24*.*49 | 20.6% | 0*.*042*∗* | 0*.*68 | Medium |
| EC2 | 102*.*90*±*23*.*77 | 11.7% | 0*.*202 | 0*.*42 | Small |
| EC3 | 84*.*75*±*24*.*82 | 35.6% | 0*.*002*∗* | 1*.*04 | Large |
| EC4 | 89*.*30*±*36*.*13 | 28.7% | 0*.*027*∗* | 0*.*74 | Medium |
| EC5 | 74*.*85*±*27*.*47 | 53.5% | *<* 0*.*001*∗* | 1*.*33 | Very Large |
| S3 | CC | 135*.*75*±*50*.*75 | - | - | - | - |
| EC1 | 106*.*65*±*29*.*51 | 27.3% | 0*.*037*∗* | 0*.*70 | Medium |
| EC2 | 154*.*70*±*42*.*13 | -12.2% | 0*.*218 | 0*.*41 | Small |
| EC3 | 93*.*70*±*23*.*30 | 44.9% | 0*.*002*∗* | 1*.*06 | Large |
| EC4 | 98*.*15*±*28*.*36 | 38.3% | 0*.*007*∗* | 0*.*91 | Large |
| EC5 | 86*.*50*±*22*.*66 | 56.9% | 0*.*007*∗* | 1*.*25 | Very Large |

表 4.3显示了这三个场景在所方法下的位置误差 S1,S2和S3违反了球形假设：p < 0.001(S1,S2), p = 0.010(S3)。应用Greenhouse-Geisser校正后，总体方差分析揭示了五个实验组之间的显著性差异：S1为F3.006,69.139 = 10.053,P < 0.001 ，S2为F3.196,86.288 = 6.067,P = 0.001, 和S3为F3.352,90.514 = 3.044,P = 0.012。事后分析表明，对于所有场景，CC 显著大于 EC3 和 EC5。与所有三个场景的对照组CC相比，EC3、EC5 显著降低了位置误差，显著性效果的范围位于“中等”和“ 很大”之间; EC1 和 EC4 显著降低了S1和S2中的位置误差；EC2没有显著降低位置误差。

表 4.3 位置误差，以毫米为单位

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 场景 | 方法 | Avg±std. dev. | (CCi-EC)/CCi | p | Cohen's d | Effect size |
| S1 | CC | 5*.*4*±*2*.*0 | - | - | - | - |
| EC1 | 3*.*0*±*1*.*4 | 80.4% | 0*.*0016*∗* | 1*.*36 | Very Large |
| EC2 | 4*.*5*±*1*.*9 | 19.7% | 0*.*1678 | 0*.*46 | Small |
| EC3 | 3.7±1.2 | 47.2% | 0.0027∗ | 1.04 | Large |
| EC4 | 3.2±0.7 | 67.5% | < 0.001∗ | 1.45 | Very Large |
| EC5 | 3.1±0.7 | 75.9% | 0.0016∗ | 1.36 | Very Large |
| S2 | CC | 3*.*8*±*2*.*2 | - | - | - | - |
| EC1 | 2*.*2*±*0*.*9 | 74.6% | 0*.*0035*∗* | 0*.*98 | Large |
| EC2 | 3*.*8*±*2*.*7 | 1.3% | 0*.*952 | 0*.*02 | Very Small |
| EC3 | 2*.*5*±*1*.*4 | 52.6% | 0*.*0310*∗* | 0*.*73 | Medium |
| EC4 | 2*.*5*±*1*.*3 | 49.6% | 0*.*0367*∗* | 0*.*70 | Medium |
| EC5 | 2*.*1*±*1*.*1 | 82.9% | 0*.*0036*∗* | 1*.*01 | Large |
| S3 | CC | 3*.*6*±*1*.*2 | - | - | - | - |
| EC1 | 2*.*9*±*1*.*5 | 22.8% | 0*.*141 | 0*.*49 | Small |
| EC2 | 3*.*2*±*1*.*7 | 11.3% | 0*.*460 | 0*.*24 | Small |
| EC3 | 2*.*2*±*1*.*0 | 62.6% | 0*.*0006*∗* | 1*.*2 | Very Large |
| EC4 | 3*.*1*±*1*.*5 | 26.9% | 0*.*0714 | 0*.*60 | Medium |
| EC5 | 2*.*3*±*1*.*0 | 57.9% | 0*.*0007*∗* | 1*.*19 | Large |

表 4.4给出了这三个场景在所有方法下的旋转误差。S1,S2和S3违反了球形假设：p < 0.001(S1,S2), p = 0.003(S3)。应用Greenhouse-Geisser校正后，总体方差分析揭示了五个实验组之间的显著性差异：S1为F2.078,47.799 = 6.357，P = 0.003，S2为F2.529,68.270 = 14.578，P < 0.001，S3的为F3.253,87.827 =10.632,P < 0.001。事后分析表明，对于两个场景，EC1、EC3、EC4 和 EC5 的旋转误差显著低于 EC1、EC3、EC4 和 EC5。 与所有三个场景的对照组CC相比，EC1、EC3、EC4和EC5显着提高了任务时间性能，显著性效果的范围位于“中等”和“ 很大”之间，EC2并没有显著降低旋转误差。

表 4.4 旋转误差，以度为单位

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 场景 | 方法 | Avg±std. dev. | (CCi-EC)/CCi | p | Cohen's d | Effect size |
| S1 | CC | 5*.*52*±*3*.*48 | - | - | - | - |
| EC1 | 3*.*62*±*0*.*67 | 52.6% | 0*.*0246*∗* | 0*.*76 | Large |
| EC2 | 4*.*19*±*0*.*97 | 31.9 | 0*.*115 | 0*.*52 | Medium |
| EC3 | 3*.*22*±*1*.*42 | 71.4% | 0*.*0111*∗* | 0*.*87 | Large |
| EC4 | 3*.*29*±*1*.*11 | 68.0% | 0*.*0112*∗* | 0*.*86 | Large |
| EC5 | 3*.*15*±*1*.*34 | 75.3% | 0*.*008*∗* | 0*.*90 | Large |
| S2 | CC | 6*.*12*±*2*.*56 | - | - | - | - |
| EC1 | 3*.*79*±*0*.*75 | 61.6% | 0*.*0004*∗* | 1*.*24 | Very Large |
| EC2 | 3*.*84*±*0*.*90 | 59.2% | 0*.*070 | 0*.*39 | Smal |
| EC3 | 3*.*18*±*1*.*11 | 92.3% | *<* 0*.*0001*∗* | 1*.*49 | Very Large |
| EC4 | 3*.*69*±*1*.*48 | 66.0% | 0*.*0009*∗* | 1*.*16 | Large |
| EC5 | 3*.*02*±*1*.*25 | 102.8% | *<* 0*.*0001*∗* | 1*.*54 | Very Large |
| S3 | CC | 4*.*20*±*1*.*92 | - | - | - | - |
| EC1 | 2*.*50*±*0*.*97 | 68.4% | 0*.*0013*∗* | 1*.*12 | Large |
| EC2 | 3*.*26*±*0*.*98 | 29.4% | 0*.*062 | 0*.*62 | Medium |
| EC3 | 2*.*32*±*1*.*14 | 80.8% | 0*.*0007*∗* | 1*.*19 | Large |
| EC4 | 2*.*54*±*1*.*39 | 80.0% | 0*.*0039*∗* | 0*.*86 | Large |
| EC5 | 2*.*12*±*1*.*30 | 97.90% | 0*.*0003*∗* | 1*.*29 | Very Large |

表 4.5显示了这三个场景的所有方法下的缩放误差。S1、S2和S3违反了球形假设：S1、S2和S3的p<0.001。在应用Greenhouse-Geisser校正后，总体方差分析揭示了五个实验组没有显著性差异：S1为F2.439,60.968 = 2.722,P = 0.063，S2为F1.824,43.775 = 0.520,P =0.761，S3 为 F3.251,87.765 = 0.664,P < 0.651。事后分析表明，对于所有场景，与CC相比，EC都没有显著降低缩放误差。

表 4.5 缩放误差，以倍数为单位

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 场景 | 方法 | Avg±std. dev. | (CCi-EC)/CCi | p | Cohen's d | Effect size |
| S1 | CC | 0*.*020*±*0*.*010 | - | - | - | - |
| EC1 | 0*.*014*±*0*.*013 | 49.9% | 0*.*275 | 0*.*73 | Middle |
| EC2 | 0*.*020*±*0*.*013 | 0.5% | 0*.*982 | 0*.*01 | Very Small |
| EC3 | 0*.*013*±*0*.*012 | 54.9% | 0*.*138 | 0*.*63 | Middle |
| EC4 | 0*.*013*±*0*.*007 | 54.9% | 0*.*090 | 0*.*63 | Middle |
| EC5 | 0*.*011*±*0*.*007 | 70.4% | 0*.*090 | 0*.*74 | Middle |
| S2 | CC | 0*.*033*±*0*.*018 | - | - | - | - |
| EC1 | 0*.*030*±*0*.*018 | 8.9% | 0*.*654 | 0*.*15 | Very Small |
| EC2 | 0*.*029*±*0*.*010 | 13.8% | 0*.*410 | 0*.*27 | Very Small |
| EC3 | 0*.*032*±*0*.*022 | 1.5% | 0*.*948 | 0*.*02 | Very Small |
| EC4 | 0*.*025*±*0*.*006 | 28.7% | 0*.*104 | 0*.*63 | Middle |
| EC5 | 0*.*030*±*0*.*022 | 7.2% | 0*.*743 | 0*.*11 | Very Small |
| S3 | CC | 0*.*012*±*0*.*007 | - | - | - | - |
| EC1 | 0*.*011*±*0*.*007 | 2.9% | 0*.*886 | 0*.*10 | Very Small |
| EC2 | 0*.*012*±*0*.*007 | 0.1% | 0*.*956 | 0*.*01 | Very Small |
| EC3 | 0*.*010*±*0*.*005 | 18.6% | 0*.*441 | 0*.*29 | Small |
| EC4 | 0*.*011*±*0*.*004 | 2.9% | 0*.*805 | 0*.*05 | Very Small |
| EC5 | 0*.*011*±*0*.*010 | 7.7% | 0*.*769 | 0*.*10 | Very Small |

图 4.1显示了这三个场景的所有方法下的Teleport次数。违反了球形假设：p = 0.03(T), p < 0.001(RS)。应用Greenhouse-Geisser校正后，总体方差分析揭示了五个实验组的显著性差异：T为F3.701,118.423 = 4.991,P = 0.001，RS为F2.406,76.985 = 3.443,P = 0.029。事后分析表明，对于所有场景，EC1-5的T并不明显大于 CC。对于所有场景，EC1-5 的 RS并不明显小于CC。

图 4.1 Teleport次数

图 4.2显示了所有三个场景在 EC2、EC4 和 EC5 中的地图使用时间和数量。对于地图使用时间，(a)符合了球形假设：p = 0.619，整体方差分析揭示了三个条件之间的显著性差异：F2,28=20.494，p<0.001。(c)违反了球形假设：p = 0.014。应用 Greenhouse-Geisser 校正后，总体方差分析揭示了三个条件之间的显著差异：F1.372,20.586 =15.976,P<0.001。事后分析表明对于所有场景，EC4和EC5的地图使用时间都明显小于EC3。对于地图使用次数，(b)违反了球形假设：P < 0.001。应用Greenhouse-Geisser校正后，总体方差分析揭示了三个条件之间的显著差异：F1.313,38.084 = 15.577,P < 0.001。(d)违反了球形假设：P < 0.224，总体方差分析揭示了三个条件之间的显著差异：F2,62 = 16.508,P < 0.001。 事后分析表明，对于所有场景EC4和EC5的地图使用数量都明显小于EC3。

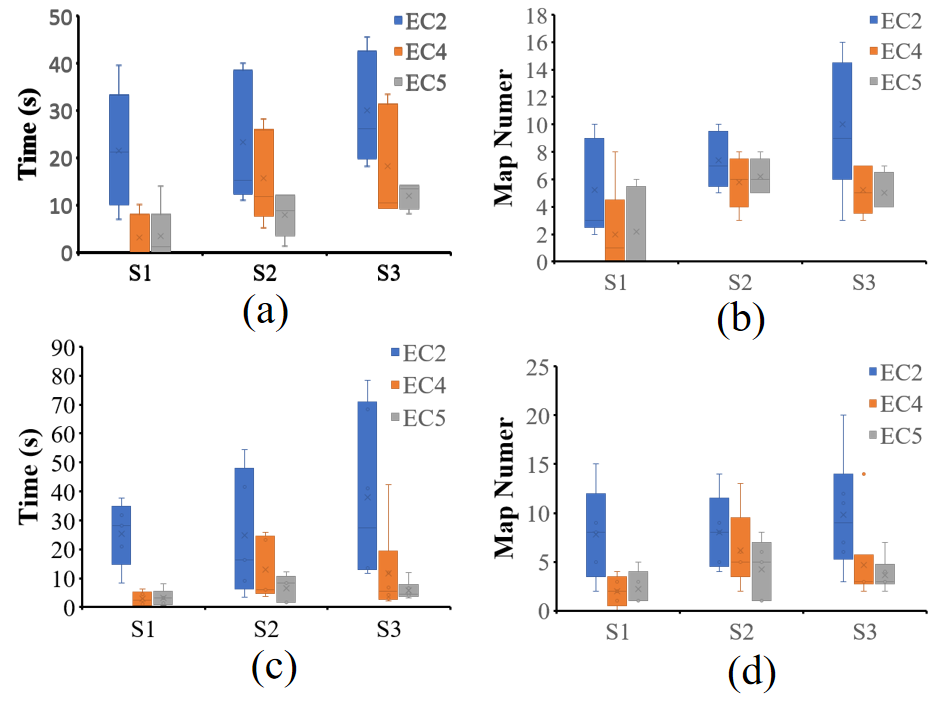


图 4.2 地图使用时间和数量。(a)和(b)分别是负责平移的用户的地图使用时间和地图使用次数。

(c)和(d)分别是负责旋转和缩放的用户的地图使用时间和地图使用次数

### 4.2.2主观度量

我们还使用问卷调查了我们方法的任务负载和排名得分。

图 4.3显示了任务负载的结果。S1、S2和S3违反了球形假设：p < 0.001。应用 Greenhouse-Geisser校正后，总体方差分析揭示了五个实验组的显著差异：S1为F2.027,38.508 = 25.364,P < 0.001，S2为F2.463,46.798 = 45.621,P < 0.001，S3为F2.793,53.068 = 26.250,P < 0.001。事后分析表明，EC5、EC3、EC4和EC5的任务负载在所有场景下都显著小于CC，EC2的任务负载在所有场景下均不显著小于CC。图 4.4显示了所有方法的排名结果。违反了球形假设：p < 0.001。应用Greenhouse-Geisser校正后，总体方差分析揭示了五个实验之间的显著差异：F2.516,62.902 = 72.215,P < 0.001。事后分析表明，对于所有场景，EC1-5的排名得分均显著高于CC。

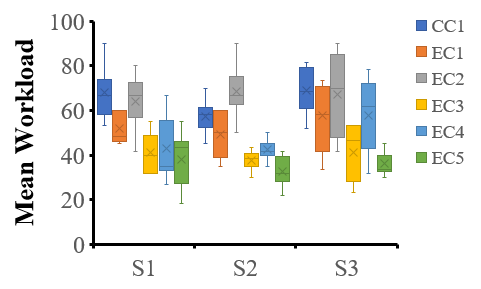


图 4.3 平均任务负载

图 4.4 每种方法的Rank Score

### 4.2.3结果分析

平移、旋转、缩放的配合是很重要的，如果在平移对象的时候，对象旋转和缩放不及时，会影响平移的精确度。同样，如果旋转和缩放对象的时候，平移对象不及时，会影响旋转的精度。由于不同的操纵视点适合的操纵类型不同，我们的操作场可以引导用户及时到合适的操纵点，使得两个用户能够及时的平移旋转和缩放对象，在一定程度上提高了效率。EC\_2虽然也能够引导用户到合适的操纵点，但是用户频繁看地图导致用户不能够及时到合适的操纵点进行操纵，影响了操纵效率。

操作场在更新的适合去掉了一些不可能的操纵点，用户能够避免去这些不可能的操纵视点进行操纵，这在很大程度上也提高了用户协同操纵的效率。

EC3和EC5比EC1,EC4更有效率，可能是因为EC1和EC5中采用的小球引导的操纵视点不直观，用户不能够精确的使用Teleport方法传输到相应的位置。并且小球会对用户的视线会形成遮挡，影响操纵。EC3在场景1中比EC5更有效率，在场景2和场景3中EC5比EC3更有效率，同样地EC1在场景1中比EC4更有效率，在场景2和场景3中EC4比EC1更有效率，可能是因为场景1小，遮挡少，地图对操纵的引导的作用小，从图 4.2上看到场景1中地图的使用时间和次数明显比场景2和场景3少。

# 结论与展望

## 1 工作及研究总结

为了帮助用户在可自由移动的场景中找到更适合操作的操作位置，我们提出了一种基于操作场引导的虚拟对象协同操作方法。我们提出了协同对象操作引导场的概念同时设计了一套用于用户使用的操作场方法。我们根据场景对物体的遮挡因子和物体与目标之间的位置信息差异构建了某个操作位置的操作度量。因为多人协同操作囊括了单人操作，因此我们设计了一个多用户协同操作实验来评估操作引导场的有效性，我们首次比较了不同的导航方式：小球引导、小地图引导和地面色块引导对用户操作的影响。

本文的方法最终通过实验验证了我们操作场的有效性，我们所有的拥有导航场的实验组在任务完成时间和操作精度上都基本显著高于对照组。在我们的三个场景中，绝大多数用户更喜欢地面色块的方式。

## 2 缺点与不足

本文提出的方法仍然有很多不足之处，我们的TRS计算中使用的相机一直只朝向一个位置，即目标和操作物体的中点。但是在实际用户走到该视点处时，该用户在该点的视点不应该只是朝向一个方向，而是一个类似全景图的度量，但是由于计算量过大，可能导致不能实时更新，我们没有尝试使用这种方法。而且当目标和物体之间的很远时，我们的相机朝向中点有可能两个物体都无法看到。

我们的预处理策略也有不足之处，预处理后的采样点未必能够满足一些特殊场景中的需求。例如两个场景中障碍物较多时，在第一次预处理阶段场景中可能不存在一个视点能够同时看到两个物体，则只有第二遍预处理的采样点供用户使用。同时我们预处理后的采样点将固定不变，没有随着用户的操作而动态改变位置。

## 3 工作展望

本文目前工作的主要不足在于TRS度量的设计、预处理后采样点位置不随用户操作改变以及可视化方式是对分量可视化。未来我们会探索实现更加能够表示某个操作位置对用户操作的难易程度的度量方式，尝试使用采样点流水式移动的方法实现采样点位置信息的改变以及探索更多的可视化方式。

# 致谢

# 参考文献

1. Bowman D A, Hodges L F. Formalizing the design, evaluation, and application of interaction techniques for immersive virtual environments[J]. Journal of Visual Languages & Computing, 1999, 10(1): 37-53.
2. Bowman D A, Kruijff E, LaViola Jr J J, et al. 3D user interfaces: theory and practice[M]. Addison-Wesley, 2005.
3. Nielson G M, Olsen Jr D R. Direct manipulation techniques for 3D objects using 2D locator devices[C]//Proceedings of the 1986 workshop on Interactive 3D graphics. 1987: 175-182.
4. Zeleznik R C, Forsberg A S, Strauss P S. Two pointer input for 3D interaction[C]//Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics. 1997: 115-120.
5. Wilson A D, Izadi S, Hilliges O, et al. Bringing physics to the surface[C]//Proceedings of the 21st annual ACM symposium on User interface software and technology. 2008: 67-76.
6. HILLIGES O,D KIM,IZADI S, et al. HoloDesk: Direct 3D interactions with a situated see-through display[C]// Proceedings of the 2012 ACM annual conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, 2012.
7. FROEHLICH B . The Quest for Intuitive 3D-Input Devices[J]. personalizing interactions with information systems, 2005.
8. LAVALLE S. M.: Virtual Reality[M]. Cambridge University Press, U.K., 2017.
9. ROBERT C. ZELEZNIK, ANDREW S. FORSBERG, AND PAUL S. STRAUSS. Two pointer input for 3D interaction[C]. In Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 115–120,1997.
10. NIELSON G. M., OLSEN JR D. R.: Direct manipulation techniques for 3D objects using 2D locator devices. In Proceedings ofthe 1986Workshop on Interactive 3D Graphics (1987), ACM, pp. 175–182.
11. Wang R, Paris S, Popović J. 6D hands: markerless hand-tracking for computer aided design[C]//Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology. 2011: 549-558.
12. Mendes D, Relvas F, Ferreira A, 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. 2016: 261-268.
13. Nguyen T T H, Duval T. Poster: 3-Point++: A new technique for 3D manipulation of virtual objects[C]//2013 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI). IEEE, 2013: 165-166.
14. Nguyen T T H, Duval T, Pontonnier C. A New Direct Manipulation Technique for Immersive 3D Virtual Environments[C]//ICAT-EGVE. 2014: 67-74.
15. Gloumeau P C, Stuerzlinger W, Han J H. Pinnpivot: Object manipulation using pins in immersive virtual environments[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2020, 27(4): 2488-2494.
16. Poupyrev I, Billinghurst M, Weghorst S, 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. 1996: 79-80.
17. Bowman D A, Hodges L F. An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments[C]//Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics. 1997: 35-ff.
18. Frees S, Kessler G D, Kay E. PRISM interaction for enhancing control in immersive virtual environments[J]. ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI), 2007, 14(1): 2-es.
19. Wilkes C, Bowman D A. Advantages of velocity-based scaling for distant 3D manipulation[C]//Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology. 2008: 23-29.
20. Osawa N. Two-handed and one-handed techniques for precise and efficient manipulation in immersive virtual environments[C]//International Symposium on Visual Computing. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008: 987-997.
21. Kim H, Lee G, Billinghurst M. A Non-linear Mapping Technique for Bare-hand Interaction in Large Virtual Environments[C]//Proceedings of the Annual Meeting of the Australian Special Interest Group for Computer Human Interaction. 2015: 53-61.
22. Kim K, Lawrence R L, Kyllonen N, 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). IEEE, 2017: 243-244.
23. PINHO M S, DA BOWMAN, FREITAS C. Cooperative object manipulation in collaborative virtual environments[J]. Journal of the Brazilian Computer Society, 2008, 14(2):53-67.
24. RUDDLE R, SAVAGE J. Symmetric and asymetric action integration during cooperative object manipulation in virtual environments[J]. ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 2002, 9(4): 285–308.
25. Riege K, Holtkamper T, Wesche G, et al. The bent pick ray: An extended pointing technique for multi-user interaction[C]//3D User Interfaces (3DUI'06). IEEE, 2006: 62-65.
26. Duval T, Lécuyer A, Thomas S. Skewer: a 3d interaction technique for 2-user collaborative manipulation of objects in virtual environments[C]//3D User Interfaces (3DUI'06). IEEE, 2006: 69-72.
27. Soares L P, Kopper R, Pinho M S. Ego-exo: A cooperative manipulation technique with automatic viewpoint control[C]//2018 20th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR). IEEE, 2018: 82-88.
28. Le Chénéchal M, Lacoche J, Royan J, et al. When the giant meets the ant an asymmetric approach for collaborative and concurrent object manipulation in a multi-scale environment[C]//2016 IEEE Third VR International Workshop on Collaborative Virtual Environments (3DCVE). IEEE, 2016: 18-22.
29. Grandi J G, Debarba H G, Maciel A. Characterizing asymmetric collaborative interactions in virtual and augmented realities[C]//2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). IEEE, 2019: 127-135.
30. Lages W. Ray, camera, action! A technique for collaborative 3D manipulation[C]//2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI). IEEE, 2016: 281-282.
31. Baron N. Collaborativeconstraint: Ui for collaborative 3d manipulation operations[C]//2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI). IEEE, 2016: 273-274.
32. Wang L, Liu X, Li X. VR Collaborative Object Manipulation Based on Viewpoint Quality[C]//2021 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). IEEE, 2021: 60-68.
33. Moravec H, Elfes A. High resolution maps from wide angle sonar[C]//Proceedings. 1985 IEEE international conference on robotics and automation. IEEE, 1985, 2: 116-121.
34. Khatib O. Dynamic control of manipulator in operational space[C]//Proc. 6th IFToMM World Congress on Theory of Machines and Mechanisms. 1983: 1128-1131.
35. Patil S, Van Den Berg J, Curtis S, et al. Directing crowd simulations using navigation fields[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2010, 17(2): 244-254.
36. Bachmann E R, Hodgson E, Hoffbauer C, et al. Multi-user redirected walking and resetting using artificial potential fields[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2019, 25(5): 2022-2031.
37. Dong T, Chen X, Song Y, et al. Dynamic artificial potential fields for multi-user redirected walking[C]//2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). IEEE, 2020: 146-154.
38. Messinger J, Hodgson E, Bachmann E R. Effects of tracking area shape and size on artificial potential field redirected walking[C]//2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). IEEE, 2019: 72-80.
39. Freitag S, Weyers B, Kuhlen T W. Automatic speed adjustment for travel through immersive virtual environments based on viewpoint quality[C]//2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI). IEEE, 2016: 67-70.
40. Freitag S, Weyers B, Kuhlen T W. Interactive exploration assistance for immersive virtual environments based on object visibility and viewpoint quality[C]//2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). IEEE, 2018: 355-362.
41. Hart S G. NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later[C]//Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting. Sage CA: Los Angeles, CA: Sage publications, 2006, 50(9): 904-908.
42. Hart S G, Staveland L E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research[M]//Advances in psychology. North-Holland, 1988, 52: 139-183.
43. Kennedy R S, Lane N E, Berbaum K S, et al. Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness[J]. The international journal of aviation psychology, 1993, 3(3): 203-220.
44. Kim H, Lee G, Billinghurst M. A Non-linear Mapping Technique for Bare-hand Interaction in Large Virtual Environments[C]//Proceedings of the Annual Meeting of the Australian Special Interest Group for Computer Human Interaction. 2015: 53-61.
45. Shapiro S S, Wilk M B. An analysis of variance test for normality (complete samples)[J]. Biometrika, 1965, 52(3/4): 591-611.
46. Mauchly J W. Significance test for sphericity of a normal n-variate distribution[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1940, 11(2): 204-209.
47. Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences[M]. Routledge, 2013.