

面向沉浸式虚拟现实的数字地球交互漫游方法

谭力恒, 蒋秉川*, 李锋, 魏然

(战略支援部队信息工程大学地理空间信息学院 郑州 450000)
(vrlab635286@163.com)

摘要: 针对目前沉浸式虚拟现实相关工作通常是基于局部环境构建的, 在全球大范围场景方面仍存在空白和不足的问题, 提出一种面向沉浸式虚拟现实的数字地球交互漫游方法. 首先, 确立以观察者为中心的视点控制基本范式; 其次, 推导设备坐标系与大地坐标系、空间直角坐标系之间的 2 种基本对应关系, 将真实世界中人的活动空间连续映射到数字地球中; 然后, 考虑当前硬件条件, 提出一种综合使用头盔和手柄进行全球范围漫游浏览的方法, 能够对观察方向、移动方向、移动速度进行灵活且准确的控制, 并符合人在真实世界的经验和直觉; 最后, 融合地表影像、高程、高精度倾斜模型数据构建多尺度数字地球场景, 设计多种类型漫游任务进行实验, 通过完成度、耗费时间、视线偏角等指标, 评估漫游方法的有效性、合理性和舒适度. 实验结果表明, 该方法能够有效地支撑用户在全球虚拟环境中的漫游浏览, 可以更自然、高效地完成多种类型的漫游任务, 为后续全球范围沉浸式虚拟现实相关工作提供基础.

关键词: 沉浸式虚拟现实; 数字地球; 三维漫游; 人机交互

中图法分类号: TP391.41 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2023.19363

Immersive Virtual Reality Oriented Interactive Exploration of Digital Earth

Tan Liheng, Jiang Bingchuan*, Li Feng, and Wei Ran

(Institute of Geospatial Information, Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450000)

Abstract: Considering most existing work on immersive virtual reality is based on local environment, and there are still gaps and deficiencies when it comes to global-wide scenes, an interactive exploration method for digital earth is proposed aiming at the usages in immersive virtual reality. Firstly, by discussing the basic paradigms for viewpoint resolving, the observer-centered principle is established. Secondly, 2 kinds of corresponding relations among device coordinate system, geodetic coordinate system and spatial Cartesian coordinate system are derived, which can map the activity space in real world into digital earth properly. Thirdly, considering current hardware, an earth exploring method with head mounted display and controllers is developed, which can precisely manipulate the heading direction, moving direction and moving speed, meanwhile is intuitive and easy to use. Finally, the effectiveness, rationality and comfort of exploring method is evaluated by completeness, time consuming, drift angle of sight and other indexes in various types of tasks, with a multi-scale digital earth environment constructed by combining terrain images, elevation, and high-precision 3D model of oblique photogrammetry. Experiments show that the proposed method can let users travel and observe in digital earth, and complete various kinds of exploring tasks in a more natural, flexible and immersive way, which can support further research about immersive virtual reality in global-scale environment.

收稿日期: 2021-09-15; 修回日期: 2022-03-24. 基金项目: 国家自然科学基金(41901334). 谭力恒(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为计算机图形学、虚拟地理环境、虚拟现实; 蒋秉川(1984—), 男, 博士, 讲师, 论文通信作者, 主要研究方向为知识图谱、可视分析、虚拟现实; 李锋(1982—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为战场环境仿真、虚拟现实; 魏然(1983—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为模拟训练.

Key words: immersive virtual reality; digital earth; interactive exploration; human-computer interaction

随着信息技术的发展,数字地球逐渐成为地理信息领域的一种重要概念和工具^[1]。数字地球能够集成全球范围海量、多源、多态的环境数据,包括地表影像、数字高程、倾斜模型、矢量地图、目标定位数据和众包态势数据等^[2],以构建全球范围的三维虚拟环境,并支持交互式查询和浏览,其在相关行业领域得到广泛的应用^[3-5]。近年来,不断提升的测绘数据精度,已经逐渐能够支撑目视比例尺条件下的应用。然而,传统桌面环境下基于显示器、鼠标和键盘的数字地球交互漫游方式已经不能完全满足交互式信息感知的需要。

虚拟现实是人机交互的一个重要发展方向,其目标是尽可能真实地模拟人的各种感官感受,使用户身临其境地进入到一个虚拟环境中。自2012年Facebook收购Oculus公司以来,基于可定位头盔显示器、控制手柄的沉浸式虚拟现实受到研究人员的广泛关注,并得到快速发展。沉浸式虚拟现实与数字地球具有较强的可结合性^[1,6-7]。一方面,虚拟现实技术能够让用户以自然的方式进入高精度测绘数据构建的全球虚拟环境中,近距离地接触和操控感兴趣目标、体验识别复杂的地理现象^[8]、进行面向任务的高级感知与探索^[9]。这对于设计规划、建筑信息模型、可视分析、虚拟旅游、智慧城市以及数字孪生等^[10]大比例尺相关应用具有重要意义。另一方面,数字地球为虚拟现实提供了良好的显示内容。沉浸感是虚拟现实的重要特征和要求,而世界感是沉浸感的重要组成部分。相较于传统虚拟现实所构建局部的、有边界的空间范围而言,数字地球能够提供与真实地球范围一致的虚拟环境,实现虚拟与现实的对应统一。而面向沉浸式虚拟现实的数字地球交互式漫游浏览是两者相结合的一个基础性、关键性的问题。

典型的三维交互漫游方法可分为飞行、三维拖拽、传送以及缩略图导航4类^[11]。

(1) 飞行。即直接移动视点的位置和方向,或将视点绑定在某个移动的物体上,如第一视角的射击或驾驶类游戏^[12-13]。这种交互方式能够实现灵活的三维观察,但需要用户同时使用鼠标、键盘控制6自由度参数,要求用户具有较高的熟练度才能掌握。

(2) 三维拖拽。即以物体或空间中一点为目标,通过移动目标位置,以及改变视线相对于目标的角度和距离,来解算出视点位姿。这种漫游方式

的约束性较强、易于掌握,在传统桌面数字地球系统、计算机辅助设计等领域应用较为广泛^[14-15]。

(3) 传送。即通过点选等方式确定空间中一点,将视点直接移动至该点而省略中间的移动过程^[16]。其优点是直接、快速,能够避免移动过程可能产生的眩晕感,但也会因移动的非连续性而导致感知信息的缺失。

(4) 缩略图导航。即提供一个场景缩略图,用户点击缩略图上一点,即可飞行或传送至该位置。这种方式能够让用户快速进行大范围的移动,并了解自身在整个场景中的位置,但移动的精度低、具有非连续性。

这些三维交互漫游方式往往不能够兼顾连续性、准确性和易用性。例如,传送、缩略图导航等方法在连续性和准确性方面存在不足;飞行方法缺乏约束、易用性较差,应用场景受限。

因此,已有的桌面环境下的数字地球交互漫游相关工作主要是基于三维拖拽法^[17-18]。即先确定被观察点的位置(经度、纬度和高度),再以被观察点为原点、以经纬圈切线方向为坐标轴建立坐标系。在此坐标系下,根据视线的角度和距离即可求解出视点位姿。此时,通过鼠标和键盘交互,改变被观察点位置即可完成平移,改变旋转角和俯仰角即可完成旋转,改变视线距离即可完成缩放。

但对于沉浸式虚拟现实条件下数字地球交互漫游,现有相关工作较少,传统桌面方法不能够直接使用。早期的将虚拟现实和地理信息相结合的工作中,使用了额外的交互设备来代替鼠标、键盘的输入消息,如触摸板^[19]、转椅^[20]、数据手套^[21]、Kinect 红外摄像头等^[22-24],并使用桌面显示器或头盔式显示器^[25-26]。在本质上,这是对桌面方法的机械调用,不能较好地适用于沉浸式应用。文献[27]基于现代的沉浸式虚拟现实设备和图形引擎构建了局部的虚拟地理环境,并采用了飞行方法用于漫游,但其仍不适用于全球环境。文献[28]认为,要将虚拟现实设备空间映射到球面一点,其漫游方式仅考虑了局部直角坐标系下的三维拖拽法,并不能支持大范围球面漫游。Google Earth VR的相关工作^[29-30]中同样采用三维拖拽的方式操控数字地球,其通过手柄射线与地面、地物求交代替了桌面环境下的鼠标点选。这种方法在近地面浏览时会因地形相对起伏较大,容易产生抖动、跳变、眩晕感等缺陷。为此,该方法还采用射线向下弯曲、低通

滤波、动态拖拽速率等方式进行了改进。Google 的工作采用了大量的修补措施, 将桌面数字地球交互方式移植到沉浸式虚拟环境下, 使其达到了一定的可用程度。但本质上, 通过拖拽地面进行漫游与人在世界中的经验和感受是相违背的, 用户使用时难以快速掌握, 并且不支持全球范围的连续漫游。

综上所述, 当前沉浸式虚拟现实条件下的全球交互漫游相关工作仍然存在空白和不足, 没有根据沉浸式交互的特点和全球漫游原理进行针对性设计实现。已有工作中, 一部分为面向局部场景和坐标系开展的, 漫游区域受限; 另一部分为机械套用桌面端三维拖拽法, 其漫游方式的有效性、灵活性和直观易用性均存在提升空间。

针对这些问题和不足, 本文提出一种面向沉浸式虚拟现实的数字地球漫游方法, 以支持对全球范围虚拟环境进行连续、灵活、准确、自然的交互式浏览。主要研究内容包括以下 3 个方面:

- (1) 确定沉浸式全球漫游浏览过程中所应采用的视点解算基本范式;
- (2) 分别推导不同距离情况下, 将真实世界中人的位姿映射到数字地球中的合理方式;
- (3) 面向当前主流沉浸式虚拟现实硬件条件, 构造一种符合人直觉的、支持全球大范围多尺度虚拟环境的、灵活准确的交互式漫游浏览方法。

1 视点漫游的基本范式

三维漫游本质上是一种相对变换, 从移动视点和移动物体 2 个角度进行思考和解算均可以得到等价的结果。对于静态的、简单的场景而言, 可认为令视点保持不动对整个虚拟场景实行平移、旋转、缩放等变化^[31]。对于更一般化的、更复杂的三维场景, 为了便于进行真实地理位置相关的计算, 本文从在世界坐标系下移动视点的角度来解算三维漫游。

如上文所述, 三维场景的视点漫游方法包括飞行、三维拖拽、传送、缩略图导航等。而从人与虚拟环境关系的角度上看, 这些视点漫游方法可以归结为 2 个基本范式, 即以被观察目标为中心和以观察者为中心, 如图 1 所示。例如, 三维拖拽是以被观察目标为中心的方法, 飞行、传送和缩略图导航方法则能够以任意一种范式设计实现。

以被观察目标为中心的漫游, 需要先确定场景中一点为观察目标, 再根据视点相对于观察目标的方向和距离反算出视点的位置和姿态, 当前桌面数字地球系统中采用的就是此类方法。在实

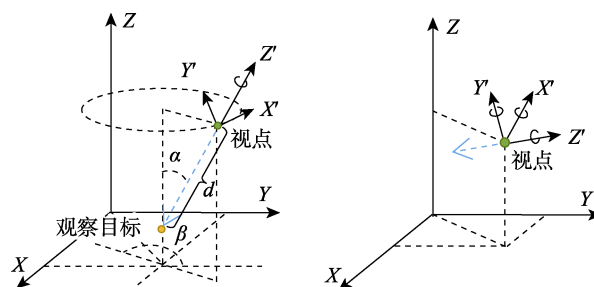


图 1 以被观察目标为中心和以观察者为中心

际使用中, 用户通过交互仿佛在以目标点为中心对整个世界进行旋转和缩放。

以观察者为中心的漫游, 是直接改变视点在世界坐标系中的位置和姿态。这种方式能够更加灵活地改变和控制视点的 XYZ 坐标和朝向(在使用欧拉角定义朝向时, 为 6 自由度控制)。其缺点是用户使用时缺乏操控和关注的重心, 难以熟练掌握, 容易产生眩晕感。

在桌面数字地球系统中, 通常使用显示器来观察虚拟环境。此时, 计算机生成的三维场景只占据用户视野的一小部分, 而占据视野大部分的真实世界场景在整个漫游过程中是相对静止的。因此, 用户的直观感受是仿佛在通过交互来操控一个物体, 如一张地图或地球仪。此时, 使用以被观察目标为中心的视点变换方式是比较合适的。

基于头盔式显示器的沉浸式虚拟现实, 能够为用户提供超过 110° 的视场角, 并且通过硬件遮挡屏蔽了真实世界对观察的影响。因此, 用户所观察的全部内容均是由计算机生成的, 使得用户仿佛完全进入到一个虚拟的世界中去。此时, 用户的交互漫游方式应与人在真实世界中的移动方式类似。即能够根据意愿灵活地移动自身, 而非整个环境, 从而实现漫游和观察。

因此, 本文认为在沉浸式虚拟现实和数字地球的应用条件下, 传统以被观察目标为中心的视点漫游方法将不再适用, 而应当基于以观察者为中心的漫游范式, 遵循灵活、自然、适人化的原则, 尽可能地模拟人在真实世界中的运动方式, 设计一种适用于全球范围的视点漫游方法。

2 虚实空间关系映射

在三维场景中, 需要考虑模型和视点的位置姿态。模型的原始顶点坐标 V_{Model} 是在各个模型自身的模型坐标系下定义的。为了形成整个三维场景, 则需要定义世界坐标系, 并确定各模型的模型

坐标系和世界坐标系之间的相对位姿变换, 即模型变换, 将 V_{Model} 转换为世界坐标系下坐标 V_{World} .

本文采用 4×4 矩阵

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \Delta x \\ y_1 & y_2 & y_3 & \Delta y \\ z_1 & z_2 & z_3 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & 0 \\ y_1 & y_2 & y_3 & 0 \\ z_1 & z_2 & z_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

来描述不同坐标系之间的空间变换.

由此可以看出, 该矩阵结合了旋转和平移来描述 2 个三维坐标系之间的相对变换. 其中, 向量 $v_i = (x_i, y_i, z_i) (i=1, 2, 3)$ 分别是新坐标系 3 个坐标轴方向的单位向量在原坐标系下的描述, 描述了最终的旋转变换. 而平移变换由向量 $v_o = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 确定, 是新坐标系原点在原坐标系下的位置.

多个模型共同构成世界场景. 对于每个模型, 可以使用相应的模型变换矩阵 M_{Model} 将其移动到世界坐标系下的目标位姿. 同理, 可以使用视图变换矩阵 M_{View} 将视点移至世界坐标系下的特定位姿. 则模型顶点坐标在模型坐标系、世界坐标系和视图坐标系之间的转换关系为

$$\begin{cases} V_{World} = M_{Model} V_{Model} \\ V_{View} = M_{View}^{-1} V_{World} \end{cases} \quad (2)$$

本文工作的核心是设计合理的交互方式, 使用户能够基于头盔显示器和手柄等设备, 以自然、灵活、准确的方式控制 M_{View} 矩阵, 实现球面空间的漫游浏览. 为此, 需要将头盔、手柄等硬件模块在真实世界的位置和姿态合理地映射到数字地球虚拟世界的世界坐标系中, 即求解各硬件模块的模型坐标系相对于世界坐标系的模型变换矩阵 M_{Model} .

2.1 设备坐标系的确定

当前, 沉浸式虚拟现实系统的硬件模块包括头盔式显示器和控制器等. 系统通常能够通过驱动设置在真实世界中的某个区域定义一个设备坐标系, 并实时地获取各硬件模块相对于设备坐标系的变换矩阵. 这些矩阵描述了各模块在设备坐标系下的位置和姿态.

以 HTC VIVE 设备为例, 在运行房间定位设置、圈定出房间中可活动的地面空间区域后, 系统会自动构造一个能容纳于所选区域的最大面积的长方形. 经测试, 系统会以长方形中心的地面点为原点、以长方形边的方向为 X 轴和 Z 轴, 以垂直地面向上方向为 Y 轴, 建立图 2a 所示用于追踪各个设备模块位置和姿态的设备坐标系; 而头盔、手柄、定位基站各自的模型坐标系定义如图 2b 所示.

HTC VIVE 主要硬件模块包括 1 个头盔显示器、

2 个控制手柄和 2 个定位基站. 通过激光定位技术, 系统能够实时地获取每个硬件模块模型坐标系相对于设备坐标系的位姿变换矩阵, 可记为 M_{Device} , $Device \in \{HMD, Controller1, Controller2, Base1, Base2\}$.

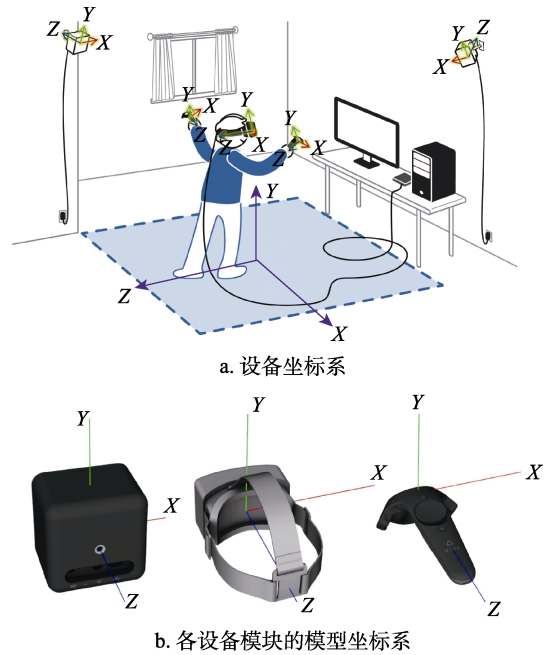


图 2 设备坐标系和各设备模块的模型坐标系

2.2 设备坐标系与空间直角坐标系的相对变换

要实现人在数字地球中的漫游, 首先需要定义视图坐标系在世界坐标系中的合理映射^[32-33]. 在数字地球系统中, 通常会建立如图 3 所示的大地坐标系和空间直角坐标系用于描述空间中任意位置. 大地坐标系通过纬度、经度和高度坐标进行描述; 而相应的空间直角坐标系的定义, 通常以大地椭圆中心为原点, 以 0° 经纬度方向为 X 轴, 以 0° 纬度、东经 90° 方向为 Y 轴, 以北纬 90° 方向为 Z 轴. 本文以此形式的空间直角坐标系作为三维虚拟场景的世界坐标系.

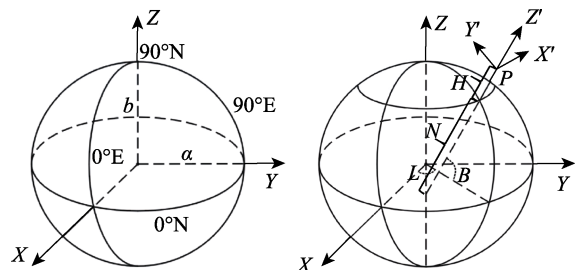


图 3 空间直角坐标系与大地坐标系对应关系

假设空间中任意一点 P 的大地坐标, 即经度、纬度、高度坐标为 (B, L, H) , 其空间直角坐标为

(x, y, z) , 则两者之间的一种相互转换方式^[34-35]为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+H)\cos(B)\cos(L) \\ (N+H)\cos(B)\sin(L) \\ (N(1-e^2)+H)\sin(B) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} B \\ L \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \frac{z+e'^2 b \sin^3 \theta}{\sqrt{x^2+y^2-e^2 a \cos^3 \theta}} \\ \arctan \left(\frac{y}{x} \right) \\ \frac{z}{\sin(B)} - N(1-e^2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, a 表示当前使用的大地参考椭球长半轴长度; b 表示短半轴长度; $e = \sqrt{a^2 - b^2} / a$ 表示大地椭球的第1偏心率; $e' = \sqrt{a^2 - b^2} / b$ 表示大地椭球的第2偏心率; $N = a / \sqrt{1 - e \sin(B)}$ 表示经过该点的卯酉圈半径; $\theta = \arctan \left(\frac{za}{b\sqrt{x^2+y^2}} \right)$ 表示辅助角。

根据式(1)(3), 可以基于任意一点 P 构建变换矩阵 M_{Local} , 将设备坐标系映射到球面空间中, 以确定漫游过程中人的活动空间与地球之间合理的相对关系. 其中, M_{Local} 的平移分量可由点 P 的空间直角坐标确定, 旋转分量则需要考虑设备坐标系的3个坐标轴单位向量在空间直角坐标系下的方向, 可分别记为 X_0, Y_0, Z_0 . 为了减少计算量, 本文在求解旋转分量时将大地椭球简化为正球处理.

$$M_{\text{Local1}} = \begin{bmatrix} -\sin(L) & \cos(B)\cos(L) & \sin(B)\cos(L) & (N+H)\cos(B)\cos(L) \\ \cos(L) & \cos(B)\sin(L) & \sin(B)\sin(L) & (N+H)\cos(B)\sin(L) \\ 0 & \sin(B) & -\cos(B) & (N(1-e^2)+H)\sin(B) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 远地面情况. 根据透视投影原理可知, 人和地球之间的距离越远, 则地球在视野中所占据的范围越小. 若仍使用第1种变换矩阵, 则用户必须大幅度低头向下俯瞰, 才能观察到地球. 显然这种方式是不合理的.

此时, 考虑让地球位于观察者的正前方, 即如图4b所示定义设备坐标系3个轴的单位向量: 令

$$M_{\text{Local2}} = \begin{bmatrix} -\sin(L) & -\sin(B)\cos(L) & \cos(B)\cos(L) & (N+H)\cos(B)\cos(L) \\ \cos(L) & -\sin(B)\sin(L) & \cos(B)\sin(L) & (N+H)\cos(B)\sin(L) \\ 0 & \cos(B) & \sin(B) & (N(1-e^2)+H)\sin(B) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

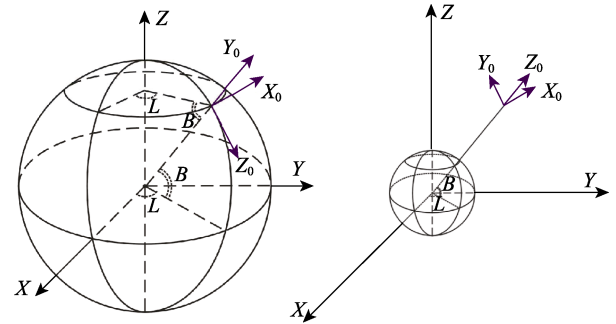
关于 M_{Local1} 和 M_{Local2} 分别应当在什么情况下使用, 本文考虑当观察者面向地球并距离较远、能够通过轻松转动头部观察到地球全貌时, 应转为使用 M_{Local2} ; 否则, 仍应使用 M_{Local1} 作为设备坐

如图4所示, 本文认为, 设备坐标系与空间直角坐标系之间存在2种基本的相对位姿关系.

(1) 近地面情况. 按照生活经验, 当人位于地面或者近地空间时, 人活动过程中通常会保持站立方向与地面相垂直. 如图4a所示, 由于设备坐标系 Y 轴为人站立方向, 则此时 Y_0 应为点 P 垂直于球面的单位向量, X_0 为点 P 正东方向单位向量, Z_0 为点 P 正南方向单位向量, 即

$$\begin{aligned} X_0 &= (\cos(L+90), \sin(L+90), 0) = (-\sin(L), \cos(L), 0); \\ Y_0 &= (\cos(B)\cos(L), \cos(B)\sin(L), \sin(B)); \\ Z_0 &= (\cos(B-90)\cos(L), \cos(B-90)\sin(L), \sin(B-90)) = \\ &= (\sin(B)\cos(L), \sin(B)\sin(L), -\cos(B)). \end{aligned}$$

由此可得到第1种情况下的设备坐标系相对于世界坐标系的变换矩阵, 即



a. 近地面情况

b. 远地面情况

图4 设备坐标系与空间直角坐标系的基本关系

Z_0 为经过点 P 垂直于球面的单位向量, Y_0 为点 P 的正北方向, X_0 为点 P 的正东方向, 即

$$\begin{aligned} X_0 &= (-\sin(L), \cos(L), 0), \\ Y_0 &= (-\sin(B)\cos(L), -\sin(B)\sin(L), \cos(B)), \\ Z_0 &= (\cos(B)\cos(L), \cos(B)\sin(L), \sin(B)). \end{aligned}$$

同理, 可以得到第2种情况下的设备坐标系相对于世界坐标系的变换矩阵, 即

标系到空间直角坐标系的变换矩阵.

由于 HTC VIVE 显示设备以及单目渲染的投影矩阵均采用垂直方向 110° 的视场角, 视场的高宽之比为 0.9 (水平视场角大于垂直视场角), 而头

部转动关节舒适的调整范围约为 $\pm 20^\circ$, 因此, 考虑如图 5 所示在视图坐标系 YZ 平面内、观察者垂直方向 150° 视场范围与地球表面相切的情况。

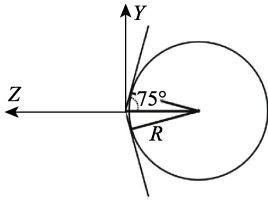


图 5 M_{Local1} 与 M_{Local2} 转换的临界距离

假设地球半径 $R \approx 6378$ km, 则视点距离地面距离为 $(R/\sin(75^\circ) - R) \approx 225$ km.

由于矩阵 M_{Local1} 和 M_{Local2} 的前 3 列分别表示设备坐标系 3 个轴方向在空间直角坐标系下的单位向量, 第 4 列表示相同的位移, 因此, 在转换时可以直接对它们进行线性插值, 将结果矩阵的前 3 列向量分别进行单位化即可完成计算. 若设定渐变过程中距离地面高度 d 的变化区间大小为 20 km, 则 M_{Local} 最终计算方式为

$$M_{Local} = \begin{cases} M_{Local1}, & \text{if } d < 225 \text{ km} \\ \text{normalized}((1-t)M_{Local1} + tM_{Local2}), & \text{if } 225 \text{ km} \leq d < 245 \text{ km}, t = (d - 225) / 20 \\ M_{Local2}, & \text{if } d \geq 245 \text{ km} \end{cases} \quad (5)$$

2.3 各个设备模块的变换矩阵解算

记头盔式显示器、2 个控制手柄和 2 个定位基站各自的模型坐标系相对于世界坐标系的变换矩阵分别为 M'_{HMD} , $M'_{Controller1}$, $M'_{Controller2}$, M'_{Base1} 和 M'_{Base2} . 根据第 2.2 节推导, 这些矩阵的计算方法为

$$M'_D = M_{Local} M_D, D \in \{HMD, Controller1, Controller2, Base1, Base2\} \quad (6)$$

其中, M'_{HMD} 可用于最终观察视角的确定. 双目立体像对渲染时所采用的视图矩阵可以基于 M'_{HMD} 计算得到^[36].

对于控制手柄, 同样可以实时由硬件系统获取到其在设备坐标系下的变换矩阵 $M'_{Controller1}$ 和 $M'_{Controller2}$, 再使用 M_{Local} 变换至世界坐标系, 即能够确定每个手柄当前在世界坐标系的位置和朝向, 可用于在虚拟全球环境中指引方向、与虚拟物体进行相交判断等. 其中, 手柄的位置坐标分别为各自矩阵的第 4 列; 手柄的旋转则由矩阵的左上 3×3 子矩阵确定, 可分别记为 $M'_{Controller1_{33}}$ 和 $M'_{Controller2_{33}}$. 根据图 2 中手柄模型坐标系定义可

知, 手柄当前指向方向单位向量计算公式为

$$\begin{cases} V_{Controller1} = M'_{Controller1_{33}} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \\ V_{Controller2} = M'_{Controller2_{33}} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

3 沉浸式交互漫游方法

文献[37]认为, 虚拟现实系统中的交互漫游应尽可能地符合人在真实世界中的经验. 为此, 本节考虑了系统硬件的消息响应机制作为交互设计的基础, 提出一种全球范围交互漫游方法. 漫游过程中应当保持人与地球相对位置关系的合理约束, 并实现移动方向与观察方向的分离以及灵活的位移参数控制.

3.1 典型交互设备消息映射

通过基站对各模块上的多个感应器进行激光定位, 系统能够实时地获取头盔、控制器等硬件模块的位置和姿态. 这些位姿信息以矩阵作为参数, 构造“移动(Move)”消息传入系统, 在场景绘制的每一帧开始前更新各模块的相对变换矩阵 M_D .

如图 6 所示, 在控制手柄上还存在多个按键, 包括: ① 菜单按键(Menu); ② 触摸板(TouchPad); ③ 系统按键(System); ④ 侧边按键(Grip); ⑤ 扳机(Triple). 其中, ①~⑤均能够按下、弹起, 并分别触发“键落(ButtonDown)”和“键起(ButtonUp)”消息. 而触摸板和扳机能够触发多维坐标轴消息, 当手指放上触摸板或扳动扳机时, 会触发“坐标轴触摸(AxisOn)”消息; 当手指离开触摸板和扳机时, 则会触发“坐标轴松开(AxisOff)”消息; 而当手指在触摸板上发生位移时, 会触发“坐标轴滑动(AxisMove)”消息, 并返回一个二维坐标 (x, y) . 其中, $x^2 + y^2 = 1$ 表示单位圆, 对应于圆形触摸板的整个区域. 同样, 扳机在扳下过程中, 当键程发生改变时, 也会触发“坐标轴滑动(AxisMove)”消息, 并返回一个 $[0, 1]$ 范围的一维坐标.

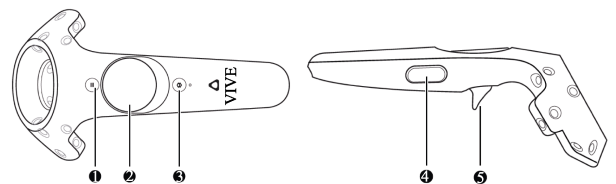


图 6 HTC VIVE 控制手柄按键

综上所述, 构建表 1 所示消息列表. 其中, 设备参数 Device 取值范围与式(6)中 D 一致, 而按键参数 $\text{Button} \in \{\text{Menu}, \text{TouchPad}, \text{System}, \text{Grip}, \text{Trigger}\}$.

表 1 HTC VIVE 设备消息映射

类型	参数 1	参数 2	参数 3	参数 4
Move	Device	M_D		
ButtonDown	Device	Button		
ButtonUp	Device	Button		
AxisOn	Device	Button		
AxisOff	Device	Button		
AxisMove	Device	Button	X 轴	Y 轴

HTC VIVE 是一种目前应用较为广泛的沉浸式虚拟现实设备, 其定位快速、准确, 控制维度丰富. 针对沉浸式全球漫游交互, 本文方法仅需要使用各个硬件模块的“移动”消息以及扳机的“键落”和“键起”消息, 即可将该设备用于其他更加一般化的沉浸式虚拟现实硬件环境.

3.2 局部与全球相结合的交互漫游

本文认为, 沉浸式虚拟现实下的全球交互漫游可以分为局部小范围和全球大范围漫游 2 个层次.

(1) 局部小范围漫游. 在构建了如前文所述的局部变换矩阵 M_{Local} , 将设备坐标系变换到球面空间后, 用户头部在真实世界中的位移和旋转会映射到数字地球构建的虚拟环境中. 此时, 用户可以用与真实世界中完全一致的方式来对虚拟环境进行交互漫游. 例如, 可以通过步行在虚拟环境中进行移动, 通过转动身体或头部向任意方向进行观察, 或通过蹲下、匍匐、跳跃等动作和姿势更加贴近虚拟的地面或物体进行详细的观察. 这也是最自然、最适人化的交互方式.

然而, 受到场地大小和定位区域的限制, 这种漫游方式的活动范围通常较为有限.

(2) 全球大范围漫游. 为了实现更大范围漫游, 本文通过改变局部变换矩阵 M_{Local} , 在球面空间对设备坐标系进行移动和旋转, 让用户能够在虚拟世界中实现全球范围的漫游. 在大范围漫游同时, 用户能够同时进行局部小范围漫游, 灵活、自然地调整观察姿态.

符合直觉的漫游原则包括:

(a) 手柄指向方向为设备坐标系原点移动方向. 这种方式符合直觉且控制灵活、易用性强.

(b) 在移动设备坐标系的原点位置后, 应当保持其与地球的相对旋转不变. 保证用户在漫游过程中保持姿态的一致性, 即持续直立或正面对于

地球, 以减少漫游过程的眩晕感.

(c) 观察和移动的分离控制更符合实际经验. 即观察方向由头盔朝向最终决定, 而移动漫游使用手柄进行控制.

因此, 本文提出全球大范围漫游交互算法步骤如下.

Step1. 绘制每一帧场景前, 根据头盔和控制手柄的 Move 消息, 更新其设备坐标系下的位姿矩阵 M_{HMD} , $M_{\text{Controller1}}$, $M_{\text{Controller2}}$.

Step2. 根据当前的局部变换矩阵 M_{Local} , 使用式(6)计算头盔和控制手柄在世界坐标系下的位姿矩阵 M'_{HMD} , $M'_{\text{Controller1}}$, $M'_{\text{Controller2}}$.

Step3. 基于 M'_{HMD} 计算双目立体视图矩阵, 对场景进行双通道绘制.

Step4. 使用式(7)计算 2 个手柄在空间直角坐标系下指向方向的单位向量 $V_{\text{Controller1}}$, $V_{\text{Controller2}}$.

Step5. 若当前 1 号手柄的扳机为按下状态, 则根据矩阵 M_{Local} 的定义可知, 当前设备坐标系原点的空间直角坐标 $O_{\text{Local}_{XYZ}}$ 可由矩阵的第 4 列得到, 即

$$O_{\text{Local}_{XYZ}} = (M_{\text{Local}}[1][4], M_{\text{Local}}[2][4], M_{\text{Local}}[3][4]).$$

根据 1 号手柄在空间直角坐标系下的指向, 移动设备坐标系原点, 即 $O'_{\text{Local}_{XYZ}} = O_{\text{Local}_{XYZ}} + \alpha V_{\text{Controller1}}$.

使用式(4)将 $O'_{\text{Local}_{XYZ}}$ 转换为大地坐标 $O'_{\text{Local}_{BLH}}$, 然后使用式(5)求解原点为 $O'_{\text{Local}_{BLH}}$ 的设备坐标系变换矩阵, 作为新的 M_{Local} . 从而实现了设备坐标系在球面空间沿着 1 号手柄指向 1 次前进. 若保持扳机为按下状态, 则可实现连续前进. 若改变 1 号手柄朝向, 则可实时改变前进的方向. 其中, α 表示当前帧移动的距离.

Step6. 若当前 2 号手柄的扳机为按下状态, 则与 Step5 类似, 按照后退进行推导和解算出新的 $O'_{\text{Local}_{BLH}}$ 和 M_{Local} . 其中, $O'_{\text{Local}_{XYZ}} = O_{\text{Local}_{XYZ}} - \alpha V_{\text{Controller2}}$.

本文在求解 α 参数时, 考虑了以下影响因素:

(a) 记当前帧距离手柄扳机最近一次按下的时间间隔为 $\Delta t/s$, 距离上一帧时间间隔为 $\Delta t'/s$.

(b) 基本移动速度 α_{base} . 考虑设备坐标系原点位于地面, 即人在数字地球中站立于地面时较为合理的基础移动速度. 按照实际生活体验以及近距离仔细观察物体的需求, 可令 α_{base} 为人类慢跑时的大概速度, 即 $\alpha_{\text{base}} \approx 3 \text{ m/s}$.

(c) 当前视点高度影响系数 α_{height} . 本文认为在漫游过程中应当令场景在视野中移动的角速率保持基本一致. 即视点距离地面高度越大, 则漫游移动的速度应当越快, 并且这种影响为线性关系. 人站立于地面时, 可假定视点距离地面的高度约为 1.7 m. 若当前设备坐标系原点距离地面距离为

$h(h \geq 0)$, 则令 $\alpha_{\text{height}} = (1.7 + h) / 1.7$.

(d) 加速度系数 $\alpha_{\text{accelerate}}$. 在移动的启动过程中, 令位移速度从 0 m/s 到最终目标速度有一个渐变而非跳变的过程, 能够有效地降低用户的眩晕感, 并实现更加精确的控制. 经过实验, 采用简单的线性加速且加速过程持续约 2 s, 则能够获得较好的体验, 即 $\alpha_{\text{accelerate}} = \min(\Delta t / 2, 1)$.

(e) 人工控制系数 α_{manual} . 提供一个可以由用户交互控制的比例系数, 调节最终速度. 在其他因素发挥作用的基础上, 能够进一步精确地将最终速度控制在一个合理的区间内. 本文通过实时获取当前 2 个手柄之间的距离 $D_{\text{Controllers}}$, 并令当前人工控制系数与该距离线性相关. 经过实验, 得到了 α_{manual} 参数的经验计算公式为

$$\alpha_{\text{manual}} = 0.5 + 2 \times \min(D_{\text{Controllers}} / 0.35, 1).$$

即 α_{manual} 最小值为 0.5, 最大值为 2.5, 并且在双手柄距离大于等于 0.35 m 时达到最大值.

综上所述, α 参数的计算公式为

$$\alpha = \Delta t' \alpha_{\text{Base}} \alpha_{\text{height}} \alpha_{\text{accelerate}} \alpha_{\text{manual}}.$$

本文提出的 α 参数计算方法综合考虑了多种因素的影响, 能够在当前视觉尺度下以合适的速度在场景中漫游. 在近地面能够有效、详细地观察环境和地物. 若需要进行全球大范围漫游, 则可以先向上移动设备坐标系和视点到达高空, 获得较大的高度影响系数 α_{height} , 再在全球尺度进行快速漫游. 到达目标地点后下降至地面.

用户采用本文方法将手柄指向目标方向并按下扳机, 即可在球面空间进行前进或后退移动. 在漫游过程中, 用户保持与地球相对姿态的一致性, 从而更清晰地感知自身与虚拟环境的关系, 降低眩晕感. 同时, 用户可以在移动过程中通过转动身体和头部向任意方向进行观察, 实现移动方向与观察方向的分离控制. 这些特点均符合人在真实世界中的漫游感受.

3.3 漫游过程中视点的合理性约束

在漫游过程中, 还应当保持视点位置和姿态的合理性. 传统桌面环境下的数字地球漫游通常令被观察点处于地面之上即可^[38]. 对于沉浸式虚拟现实漫游, 由于真实世界中人的活动空间由设备坐标系定义, 并通常位于地面上, 因此, 应当令设备坐标系原点映射到球面后保持在地面之上.

本文设计约束算法步骤如下.

Step1. 根据之前交互方法移动设备坐标系, 得到

此时的变换矩阵 M_{Local} . 从矩阵第 4 列得到当前设备坐标系原点在空间直角坐标系下的坐标 $O_{\text{Local_XYZ}}$.

Step2. 为便于计算, 可将地球简化为正球, 从球心到 $O_{\text{Local_XYZ}}$ 的单位向量为 $V_o = \text{normalized}(O_{\text{Local_XYZ}})$. 此时, 考虑全球地表高程和地物分布, 令线段 $[O_{\text{Local_XYZ}} - 15\,000 \times V_o, O_{\text{Local_XYZ}} + 10\,000 \times V_o]$ 与数字地球场景求交, 得到最外侧交点 $I_{\text{Local_XYZ}}$.

Step3. 使用式(4)分别将 $O_{\text{Local_XYZ}}, I_{\text{Local_XYZ}}$ 转换为大地坐标 $O_{\text{Local_BLH}}, I_{\text{Local_BLH}}$. 若 $I_{\text{Local_BLH}} \cdot z > O_{\text{Local_BLH}} \cdot z$, 则令 $O_{\text{Local_BLH}} \cdot z = I_{\text{Local_BLH}} \cdot z$, 并根据更新后的 $O_{\text{Local_BLH}}$ 利用式(5)重新计算变换矩阵 M_{Local} , 用于场景的绘制.

该方法能够保证视点在漫游过程中的有效性, 但当前方地形地物突然拔高、前进方向进入模型内部时, 可能造成视点在垂直方向上突变而跃升至最上方的物体表面. 故可通过添加更多方向的线段求交检测和位移限制, 以进一步精确地约束视点. 此内容不是本文工作的重点, 不做进一步讨论.

4 实验与结果分析

4.1 实验环境

构建如下的软硬件实验环境对验证本文方法进行验证.

(1) 硬件环境. 本文采用的图形计算机配置为 Intel I9-9900k 处理器, NVIDIA 2080Ti 显卡, 32 GB 内存. 采用的沉浸式虚拟现实硬件系统为 HTC VIVE. 其中, 头盔显示器双目分别具有 1 080 × 1 200 分辨率、110° 视场角、90 Hz 刷新率液晶屏, 能够通过激光定位实时获取头盔和手柄的位置和姿态, 定位精度达到 0.3 mm.

(2) 软件环境. 本文实验所采用的数字地球系统是基于 OSGEarth 进行开发构建的. 系统融合的地理数据包括全球范围基础地理数据、采用 Google Map 全球第 9 层卫星影像(分辨率约为 150 m/像素)和高程(分辨率约为 2 200 m/像素)数据; 局部地区高精度航拍影像(分辨率约为 1 m/像素)和高程(分辨率约为 10 m/像素)数据; 多组局部地区厘米级分辨率三维重建倾斜模型数据. 这些数据能够支撑从全球到局部整个漫游过程中的数字地球场景内容显示.

4.2 有效性测试

对本文方法的效果进行验证, 即能否对数字地球进行有效的漫游浏览.

如图 7 所示, 为了便于用户操作, 在场景中添加绘制了一些辅助信息, 包括虚拟世界中的手柄,

让用户能够带上头盔显示器后仍然能够感知到真实世界中手柄的位置, 并对其进行抓握和操作; 手柄方向指示线, 让用户准确认知移动方向; 目标标志符用于在全球尺度下指示具有高精度地形数据或倾斜模型数据的地点.

图 8 所示为不同距离下的球面漫游双目观察效果. 其中, 图 8a 所示为在太空中远离漫游, 此时

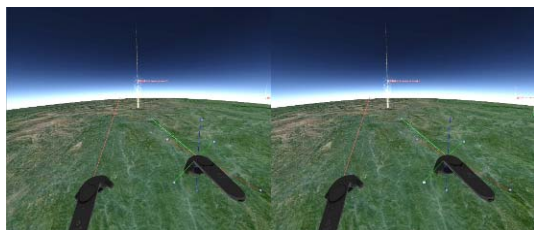
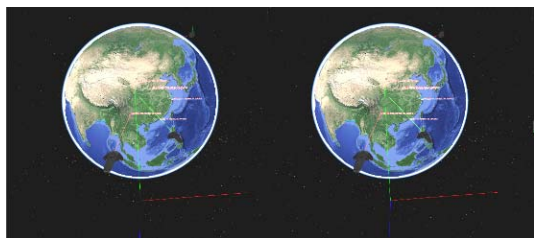
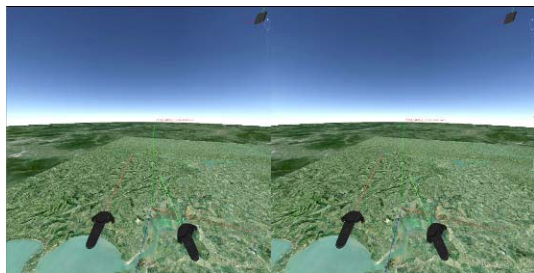


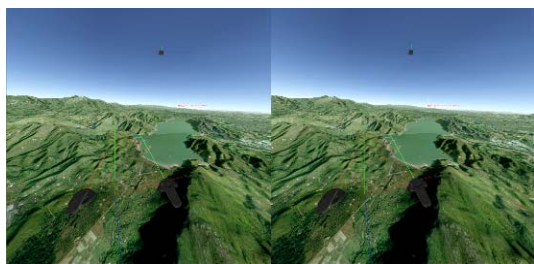
图 7 漫游过程的辅助提示信息



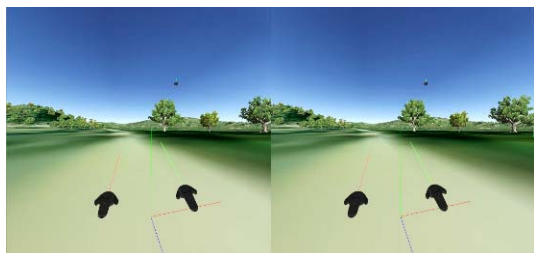
a. 远距离漫游(10000km)



b. 中等距离漫游(20 km)



c. 近距离漫游(700 m)



d. 地面漫游

图 8 不同距离下的地球漫游

视点距离地面高度约为 10 000 km. 根据式(5)可知, 当前设备坐标系 Z 轴垂直于地面向上, 用户站立时面向地球. 在此高度和比例尺下, 用户能够快速地进行全球范围漫游. 图 8b~图 8d 所示分别为距离 20 km, 700 m 和地面漫游的观察结果, 此时设备坐标系 Y 轴垂直于地面向上, 即用户站立时垂直于地面向上. 高度越高, 则漫游的位移速度越快, 越适合进行大范围漫游.

图 9 所示为从全球降落到局部高精度倾斜模型的漫游过程. 本文的漫游方法能够较好地适应城市区域大比例尺、复杂精细的局部环境, 在开阔空地和狭窄街道均能够为用户的交互控制提供足够的自由度和精确度, 并且能够保证视点的合理性, 即始终位于地面和地物之上.



图 9 近距离漫游地面城市倾斜模型视图

作为对比实验, 图 10 所示为 Google Earth VR 中以目标为中心进行三维拖拽漫游. 这种方法无法精确地控制观察时视点的位置和姿态, 手柄姿态的轻微调整会造成场景的巨大变化; 同时, 在地物较为复杂时, 拖拽锚点的选取极易出现偏差, 导致漫游结果不符合预期.

图 11 所示为 Google Earth VR 漫游过程中的部分视点控制错误. 由于缺乏约束条件, 因此拖拽漫

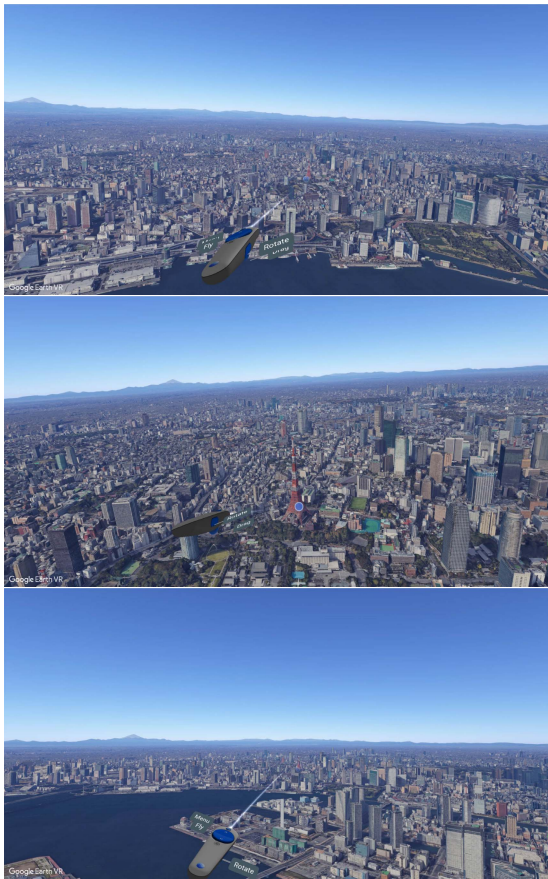


图 10 Google Earth VR 三维拖拽漫游

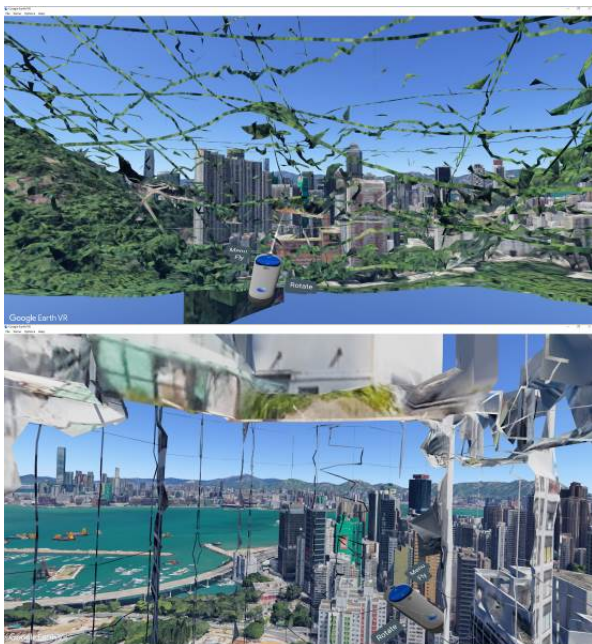


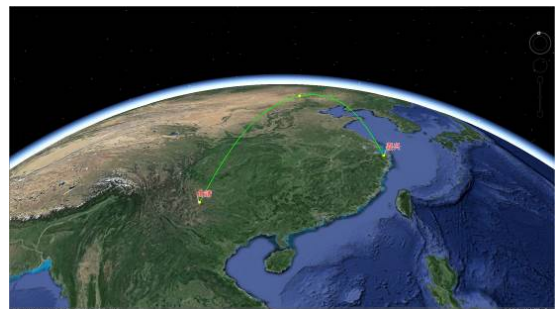
图 11 Google Earth VR 漫游过程的视点控制错误

游过程中视点可能进入场景的背面,使得观察到错误结果.

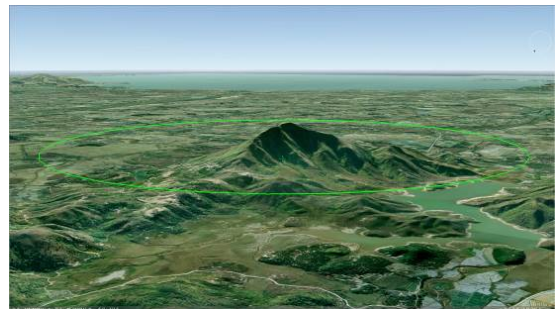
4.3 合理性测试

简明、易用、准确是评价虚拟现实交互方法的

重要标准^[39]. 为了验证本文方法漫游交互方式的合理性,即是否足够自然易用、控制精确、便于掌握,本文设计了多种漫游任务进行量化的测试与验证. 实验过程共组织了 10 名志愿者参加,其中包括 8 名学生(18~25 岁,无虚拟现实使用经验者)和 2 名教职人员(30~35 岁,有部分虚拟现实相关经验). 由图 12 可知,本文实验包括大范围漫游、目标环绕漫游和路径漫游 3 种任务. 实验对比的漫游方法包括本文提出的以观察者为中心的 360° 交互漫游方法,以及 Google Earth VR 相关工作所阐述的三维拖拽方法^[29]. 实验统计数据为漫游过程所使用的时间,以体现算法的易用性与合理性.



a. 大范围漫游



b. 目标环绕漫游



c. 路径漫游

图 12 本文设计的 3 种漫游任务

实验任务 1——大范围漫游. 由于 Google Earth VR 中的三维拖拽方法无法改变视点的高度,因此,在近地面时只能在有限范围内进行移动,无法快速完成全球大范围漫游. 若要完成实验任务 1,则需要同缩略图等方法进行结合,在不同的

漫游方法、不同的人与地球相对姿态之间进行手动切换, 这也就无法与本文方法进行同等条件下的对比。10名志愿者完成任务1用时统计结果如图13所示。其中, 用时最短为17s, 最长为28s, 平均值为22.4s, 标准差为3.86s。

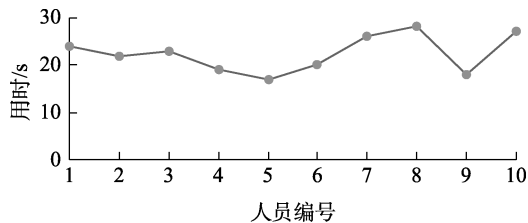


图13 本文方法大范围漫游实验用时结果

实验任务2——目标环绕漫游。沿着环绕目标的圆形路线进行漫游, 移动过程中持续对中心目标进行观察。使用本文方法完成该任务时, 需要多次中断、转动头部观察目标和轨迹提示线, 并持续调整手柄指向线的方向。而Google Earth VR的三维拖拽方法是以目标为中心的, 在选定观察点后水平旋转手柄即可实现环绕漫游, 操作过程更加快速、准确。实验结果如图14所示, 使用本文方法进行环绕漫游用时最短为19s, 最长为34s, 平均值为26.4s, 标准差为5.23s; 使用Google Earth VR拖拽方法用时最短为9s, 最长为14s, 平均值为10.9s, 标准差为1.56s。由此可以看出, 对于环绕漫游任务, Google方法的效率和稳定性均更高。

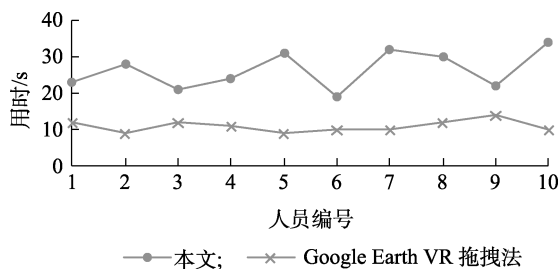


图14 2种方法环绕漫游实验用时结果

实验任务3——路径漫游。在近地面空间沿着规划好的路径进行持续移动漫游。使用三维拖拽法需要不断地用手柄选取新的观察目标, 并拖拽至身前, 过程较为烦琐且不连续。同时, 近地面环境较为复杂, 地物之间存在遮挡, 手柄容易选择到不合理的观察目标造成漫游过程的偏移。与之相比, 本文方法更适合处理这种类型的漫游任务, 手柄持续指向前方路线轨迹即可准确控制漫游方向, 可以灵活地控制漫游速度。实验结果如图15所示, 使用本文方法用时最短为22s, 最长为27s, 平均

值为24s, 标准差为1.7s; 使用Google Earth VR拖拽法用时最短为37s, 最长为52s, 平均值为44.6s, 标准差为4.77s。由此可以看出, 对于路径漫游任务而言, 本文方法具有更高的效率和稳定性。

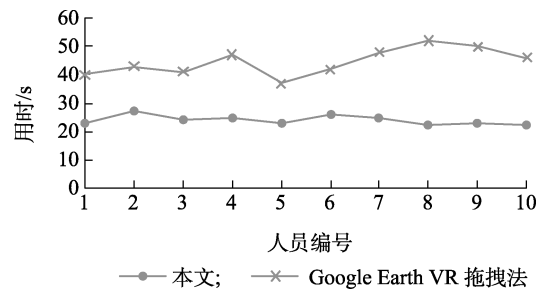


图15 2种方法路径漫游实验用时结果

结合以上实验结果分析, 本文方法能够以简明一致的方式让用户在全球范围多比例尺环境下进行连续的漫游和浏览。本文设计的交互方式通过转动身体和头部改变观察方向, 通过手柄指向确定前进或后退方向, 移动速度依照视觉比例尺确定又可灵活调整。这些设计均符合人在真实世界中进行移动的直觉, 便于为用户所掌握, 能够有效地支撑完成各种类型的漫游任务。特别是对于路径漫游这种最常用的漫游方式, 本文方法在效率、稳定性和易用性上均具有优势。但是对于环绕漫游等围绕固定目标持续观察的漫游任务, Google Earth VR提出的改进版三维拖拽法能够取得更好的效果。

4.4 舒适度测试

交互过程中舒适性的相关影响因素和评价方法较多, 对于不同交互方式和系统并没有统一标准。对于沉浸式虚拟现实交互而言, 舒适度通常需考虑以下3个方面: (1) 完成同样功能用户需要做出的交互操作的复杂程度, 复杂度越低, 则舒适度越高; (2) 交互方式与真实世界人行为方式的相似性, 即是否符合直觉习惯, 越符合则舒适度越高; (3) 交互移动过程中晕眩感, 又称晕动症, 主要来自于视觉感受和运动感受不同带来的冲突, 眩晕感越低, 则舒适度越高^[40]。

综合考虑上述3个方面因素, 本文设计了如下实验来对其进行量化评估: 分别使用本文方法和Google Earth VR拖拽法完成相同的城市漫游任务, 并持续记录各自漫游过程中头盔朝向相对于实际移动方向的偏角。本文认为, 偏角的大小和稳定度能够在一定程度上反映出交互的复杂度、移动方式是否符合直觉以及对晕动症的影响。

图 16 所示为漫游实验的可视化结果. 其中, 红色线表示漫游路径轨迹, 蓝色箭头表示不同时刻轨迹切线方向, 即当前移动方向, 绿色箭头表示对应时刻头盔朝向. 由此可以看出, 本文方法头盔朝向和移动方向一致性较高, 并且分布较为均匀, 说明移动过程速率较为平滑, 交互操作的连贯性、一致性更高. 而拖拽法箭头的分布不均匀, 这是因为漫游过程是分段进行的, 需要多次将手柄射线指向目标地点, 再拖拽至身前, 速率不稳定, 且不符合人在真实世界中的移动直觉; 拖拽法的观察方向相较于前进方向一直在进行较大幅度变化, 这是因为漫游过程需要不断改变观察和拖拽操作的目标, 增加了操作的复杂性和眩晕感.



a. 本文方法



b. Google Earth VR 拖拽法

图 16 漫游过程中的移动方向、观察方向和移动路径

图 17 统计了漫游过程中视线方向与前进方向偏角的具体数值. 由于本文方法完成同样漫游任务所耗时间较短, 因此, 采样点数量也少于拖拽法. 其中, 本文方法采样点数为 71 个, 偏角平均值约为 5.81° , 偏角标准差约为 2.86° ; 而 Google Earth VR 拖拽法采样点数为 94 个, 其偏角平均值约为 15.42° , 偏角标准差约为 8.03° . 由此可以看出, 本文方法视线偏角的平均大小和稳定性均显著优于 Google Earth VR 拖拽法, 更加符合人在真实世界中行进时的身体和头部的朝向关系, 并能够有效地降低漫游过程中需要调整头盔方向的幅度和频率, 降低操作的复杂度和眩晕感, 使得用户整体上具有更好的舒适度.

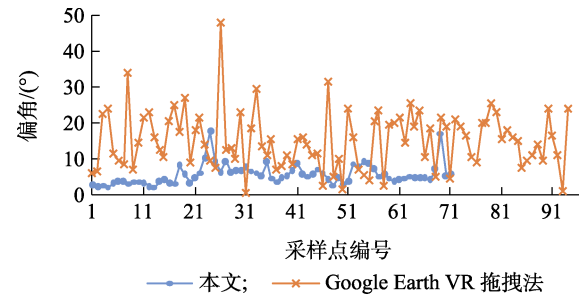


图 17 2 种方法漫游过程视线偏角统计结果

5 结 语

近年来, 沉浸式虚拟现实技术快速发展, 并在各个行业中得到广泛应用. 数字地球是地理信息领域的重要三维成果和工具, 能够构建全球范围的虚拟环境. 将两者相结合具有重要意义, 能够有效地扩展环境认知的内容和方式.

本文就数字地球应用条件下, 如何实现面向沉浸式虚拟现实的交互漫游这一基本问题进行了研究. 首先, 探讨并确定了在沉浸式虚拟现实, 数字地球漫游应当采用以观察者为中心的基本范式. 其次, 推导了 2 种距离的情况下, 设备坐标系与大地坐标系、空间直角坐标系之间的关系, 得到了其之间的相对变换矩阵. 从而在不同尺度下, 将人在真实世界中的位置和姿态合理地映射到球面空间. 在此基础上, 本文提出了一种基于沉浸式虚拟现实硬件条件的数字地球交互式漫游方法, 能够精确、灵活地控制漫游移动的方向和速度. 同时, 综合考虑了人在真实世界漫游移动和浏览的体验, 采用了简明、符合人直觉的交互逻辑, 能够便捷地被用户理解和掌握.

本文所取得的成果, 能够让用户自然、灵活、准确地在全球范围进行交互式漫游浏览, 并可为后续面向全球空间范围的沉浸式虚拟现实相关工作提供有力支撑.

参考文献(References):

- [1] Tuttle B T, Anderson S, Huff R. Virtual globes: an overview of their history, uses, and future challenges[J]. *Geography Compass*, 2008, 2(5): 1478-1505
- [2] Goodchild M F, Guo H, Annoni A, et al. Next-generation digital earth[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(28): 11088-11094
- [3] Yu L, Gong P. Google Earth as a virtual globe tool for earth science applications at the global scale: progress and perspec-

- tives[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(12): 3966-3986
- [4] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, *et al.* Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18-27
- [5] Koller D, Lindstrom P, Ribarsky W, *et al.* Virtual GIS: a real-time 3D geographic information system[C] // *Proceedings of the 6th Conference on Visualization '95*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1995: 94-100
- [6] Huang B, Jiang B, Li H. An integration of GIS, virtual reality and the internet for visualization, analysis and exploration of spatial data[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2001, 15(5): 439-456
- [7] Çöltekin A, Oprean D, Wallgrün J O, *et al.* Where are we now? re-visiting the digital earth through human-centered virtual and augmented reality geovisualization environments[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2019, 12(2): 119-122
- [8] Chen M, Lin H. Virtual geographic environments (VGEs): originating from or beyond virtual reality (VR)?[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2018, 11(4): 329-333
- [9] Lin Hui, Zhu Qing, Chen Min. The being and non-being generate each other, and the virtual and the real are mutually interactive—the progress of virtual geographic environments (VGE) studies in last 20 years[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(8): 1027-1030(in Chinese)
(林珲, 朱庆, 陈旻. 有无相生 虚实互济——虚拟地理环境研究 20 周年综述[J]. *测绘学报*, 2018, 47(8): 1027-1030)
- [10] Havenith H B, Cerfontaine P, Mreyen A S. How virtual reality can help visualise and assess geohazards[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2019, 12(2): 173-189
- [11] Danyluk K, Willett W. Evaluating the performance of virtual reality navigation techniques for large environments[C] // *Proceedings of the 36th Computer Graphics International Conference*. Heidelberg: Springer, 2019: 203-215
- [12] Wang Gongming, Guo Xinyu, Zhao Chunjiang, *et al.* View-point controlling and application in virtual walkthrough based on three dimensional geometric transformations of OpenGL[J]. *Computer Engineering and Design*, 2007, 28(24): 5973-5976(in Chinese)
(王功明, 郭新宇, 赵春江, 等. 基于 OpenGL 几何变换的虚拟漫游视点控制及应用[J]. *计算机工程与设计*, 2007, 28(24): 5973-5976)
- [13] Yang Fang, Huang Ming, Wang Yanmin. Design and implementation of 3D navigation system based on Direct3D[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2014(S2): 182-186(in Chinese)
(杨芳, 黄明, 王晏民. 基于 Direct3D 的三维场景漫游系统设计与实现[J]. *测绘通报*, 2014(S2): 182-186)
- [14] Shen Yanchun, Wang Rui, Li Chao. The study on interactive roaming method of digital earth based on Arcball[J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(10): 230-233(in Chinese)
(申闫春, 王锐, 李超. 基于 Arcball 的数字地球交互漫游方法研究[J]. *计算机仿真*, 2010, 27(10): 230-233)
- [15] McCrae J, Mordatch I, Glueck M, *et al.* Multiscale 3D navigation[C] // *Proceedings of Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*. New York: ACM Press, 2009: 7-14
- [16] Berger M, Bill R. Combining VR visualization and sonification for immersive exploration of urban noise standards[J]. *Multi-modal Technologies and Interaction*, 2019, 3(2): 34
- [17] Kim J H. The earth navigation modeling on desktop VR[C] // *Proceedings of ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 2004: 77
- [18] Wang Yonggang, Meng Yongjun, Zang Haijian. The research of visualization and roaming control of 3D-earth based on OpenGL[J]. *Surveying and Mapping*, 2016, 39(1): 24-26(in Chinese)
(王永岗, 孟永军, 臧海健. 基于 OpenGL 的三维地球可视化及漫游控制研究[J]. *测绘*, 2016, 39(1): 24-26)
- [19] Çöltekin A, Hempel J, Brychtova A, *et al.* Gaze and feet as additional input modalities for interacting with geospatial interfaces[J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, 3(2): 113-120
- [20] Gugenheimer J. Nomadic virtual reality: exploring new interaction concepts for mobile virtual reality head-mounted displays[C] // *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*. New York: ACM Press, 2016: 9-12
- [21] Kruger W, Bohn C A, Frohlich B, *et al.* The responsive workbench: a virtual work environment[J]. *Computer*, 1995, 28(7): 42-48
- [22] Boulos M N K, Blanchard B J, Walker C, *et al.* Web GIS in practice X: a microsoft kinect natural user interface for Google Earth navigation[J]. *International Journal of Health Geographics*, 2011, 10(1): 45
- [23] Stannus S, Rolf D, Lucieer A, *et al.* Gestural navigation in Google Earth[C] // *Proceedings of the 23rd Australian Computer-Human Interaction Conference*. New York: ACM Press, 2011: 269-272
- [24] Roupé M, Bosch S P, Johansson M. Interactive navigation interface for virtual reality using the human body[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2014, 43: 42-50
- [25] Germs R, Van Maren G, Verbree E, *et al.* A multi-view VR interface for 3D GIS[J]. *Computers & Graphics*, 1999, 23(4): 497-506
- [26] Verbree E, Maren G V, Germs R, *et al.* Interaction in virtual world views-linking 3D GIS with VR[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1999, 13(4): 385-396
- [27] Hruby F, Ressler R, de la Borbolla del Valle G. Geovisualization with immersive virtual environments in theory and practice[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2019, 12(2): 123-136
- [28] Huang W M, Chen J. A multi-scale VR navigation method for VR globes[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2019, 12(2): 228-249
- [29] Käser D, Parker E, Bühlmann M. Bringing Google Earth to virtual reality[C] // *Proceedings of ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 2016: Article No.78
- [30] Käser D P, Parker E, Glazier A, *et al.* The making of Google Earth VR[C] // *Proceedings of ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 2017: Article No.63
- [31] Chen C H, Yang J C, Shen S, *et al.* A desktop virtual reality earth motion system in astronomy education[J]. *Journal of Educational Technology & Society*, 2007, 10(3): 289-304
- [32] Shang Jianga, Liu Xiuguo, Zheng Kun. Research and implementation of interactive walkthrough in 3D scene[J]. *Computer*

- Engineering, 2003, 29(2): 61-62+251(in Chinese)
(尚建嘎, 刘修国, 郑坤. 三维场景交互漫游的研究与实现[J]. 计算机工程, 2003, 29(2): 61-62+251)
- [33] Peng Tao, Li Shiqi, Wang Junfeng, *et al.* Virtual assembly based on augmented human-computer interaction technology[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(3): 354-361+368(in Chinese)
(彭涛, 李世其, 王峻峰, 等. 基于增强人机交互技术的虚拟装配[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(3): 354-361+368)
- [34] Lyu Zhiping, Qiao Shubo. Foundation of geodesy[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2010(in Chinese)
(吕志平, 乔书波. 大地测量学基础[M]. 北京: 测绘出版社, 2010)
- [35] Bowring B R. Transformation from spatial to geographical coordinates[J]. Survey Review, 1976, 23(181): 323-327
- [36] Tan Liheng, Ma Qiang, Jiang Bingchuan, *et al.* OsgEarth stereoscopic vision generation method for HMD-based virtual reality[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(7): 1290-1299(in Chinese)
(谭力恒, 马强, 蒋秉川, 等. 面向头盔式虚拟现实的 OsgEarth 立体视觉生成方法[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(7): 1290-1299)
- [37] Sebok A, Nystad E, Helgar S. Navigation in desktop virtual environments: an evaluation and recommendations for supporting usability[J]. Virtual Reality, 2004, 8(1): 26-40
- [38] Guo Jinjie, Cao Zhaoyuan, Liu Jingjing. An interactive controlled method for roaming in 3D earth scene[J]. Electronics Quality, 2019(10): 46-50(in Chinese)
(郭锦杰, 曹兆元, 刘晶晶. 三维地球场景漫游的一种交互式控制设计[J]. 电子质量, 2019(10): 46-50)
- [39] Huang Jin, Han Dongqi, Chen Yineng, *et al.* A survey on human-computer interaction in mixed reality[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(6): 869-880(in Chinese)
(黄进, 韩冬奇, 陈毅能, 等. 混合现实中的人机交互综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(6): 869-880)
- [40] Zhang Xiaoting, Lu Jing, Liu Yuan, *et al.* Balance design of immersion and comfort in virtual reality technology[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(12): 91-97(in Chinese)
(张晓婷, 陆菁, 刘渊, 等. VR 交互体验中沉浸感与舒适度的平衡设计[J]. 包装工程, 2021, 42(12): 91-97)