

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209565

基于 Marker-SLAM 的视触觉增强现实交互算法^{*}

刘 佳^{1,2}, 徐 闯^{1,2}, 陈大鹏^{1,2}, 钱昌宇¹, 石 豪^{1,2}

(1. 南京信息工程大学自动化学院 南京 210044; 2. 南京信息工程大学江苏省智能气象探测
机器人工程研究中心 南京 210044)

摘 要:视触觉增强现实是将触觉感知加入到增强现实中的一种新技术。不仅可以融合真实场景和虚拟对象,还能实现视觉和触觉的同步感知。基于 3D Systems Touch 触觉设备提出一种新的视触觉交互算法。首先,基于 Marker-SLAM 算法搭建增强现实环境,用于实时获得相机在地图中的位姿;其次,为了将触觉信息融入到增强现实环境中,提出基于无跟踪器的触控笔尖端姿态优化算法;最后,分别采集测量点在触觉和世界坐标系中的三维信息,通过确定两个坐标系间的刚性变换,将触觉设备的正向运动模型映射到增强现实空间中。所提出的跟踪注册方法的注册准确率均达到 90% 以上,与基于跟踪器的方法相比,所提出的姿态优化算法获得的校正位置的平均误差为 2.3 ± 0.2 mm。

关键词: 视触觉增强现实; Marker-SLAM; 空间转换; 人机交互

中图分类号: TH7 TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.60

Visuo-haptic augmented reality interaction algorithm based on Marker-SLAM

Liu Jia^{1,2}, Xu Chuang^{1,2}, Chen Dapeng^{1,2}, Qian Changyu¹, Shi Hao^{1,2}

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
2. Jiangsu Province Engineering Research Center of Intelligent Meteorological Exploration Robot (C-IMER),
Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The visuo-haptic augmented reality is a new technology that adds haptic perception to augmented reality, which helps to realize the integration of real scenes and virtual objects, as well as the synchronization of vision and touch. This article proposes a new visuo-haptic interaction algorithm based on the 3D Systems Touch haptic device. Firstly, an augmented reality environment built on the Marker-SLAM algorithm is adopted to obtain positions and poses of the camera in the map in real time. Secondly, to integrate haptic information into the augmented reality environment, a tracker-free stylus tip pose optimization algorithm is proposed. Finally, the 3D information of the measurement points in the haptic and world coordinate systems is collected respectively. The forward motion model of the haptic device is mapped into the augmented reality space by determining the rigid transformation between the two coordinate systems. The registration accuracy of the tracking registration methods proposed in this article is all above 90%. Different from the tracker-based method, the average error of the corrected position obtained by the pose optimization algorithm in this article is 2.3 ± 0.2 mm.

Keywords: visuo-haptic augmented reality; marker-SLAM; spatial transformation; human-computer interaction

0 引 言

增强现实借助计算机图形学、视觉技术和人机交互技术等方法将计算机生成的虚拟信息无缝地注册到真实环境中。为了充分体验混合的交互环境,相关学者^[1]将

虚拟与真实物体进行融合扩展到其他感官形态,形成了一种视觉和触觉相结合的新形式——视触觉增强现实(visuo-haptic augmented reality, VHAR),即用户可以在真实场景中看到和触摸动态虚拟对象和静态真实对象,实时给予用户一种感觉刺激。VHAR 技术允许用户以协同定位的方式来感知视觉画面和动觉刺激,用户可以在同

一空间位置看到自己手持虚拟交互工具与虚拟对象进行交互的画面。相比较于传统的桌面式 AR 设计,用户仅能通过显示器看到虚拟代理操控虚拟物体进行交互的场景,无法实时感受到来自虚拟和真实对象的同步物理刺激,这导致了场景的割裂感且缺乏真实感^[2]。

近年来,VHAR 技术在娱乐、牙科和手术模拟等技能培训中越来越受欢迎。但由于各种硬件和软件的限制,视觉和触觉无法满足时间和空间上的一致性,时空不匹配会对用户的体验感造成了巨大的影响。首先触觉和视觉信息之间的不一致会削弱虚拟环境的真实感,甚至会导致手动操作的严重错误^[3]。其次错误的视觉触觉空间配准也可能导致感觉冲突和感觉重叠^[4],使得在虚拟环境中的训练无效,甚至导致负技能迁移^[5]。相关学者研究了影响人类空间和时间同步性的因素^[6-8],为了实现视觉和触觉同步刺激,需要进行精确的手眼协调。所以精确校准视觉触觉增强现实系统的组件以及它们之间的空间关系尤为重要^[9]。

1 相关工作

为了提供真实的用户体验,本文采用 3D Systems Touch 触觉设备提供力触觉反馈,如图 1 所示。触觉设备由触控笔、基座和两个相互连接的万向节组成,两个关节连接处的角度决定了触控笔的位置,触控笔与万向节连接处称为触觉交互点(haptic interface point, HIP)。为了将触觉设备集成到 AR 环境中,研究者已经提出了各种解决方案,但是这些解决方案都集中在 HIP 位置的校准,而 HIP 位置的校准对于线性力反馈是非常重要的^[10]。为了将虚拟对象精准注册到触控笔上,如图 2 所示,还必须正确校正其位置方向^[11]。

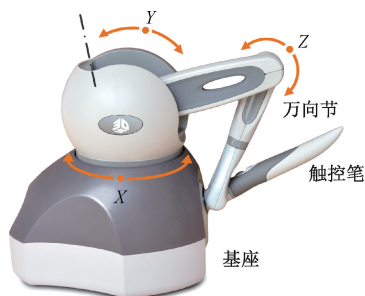


图 1 3D Systems Touch 触觉设备

Fig. 1 3D Systems Touch haptic device

将触觉设备集成到 AR 中是由 Vallino 等^[12]首先提出的,他们通过测量两帧中的 4 个点并估计它们之间的仿射变换来确定触觉和世界坐标系之间的关系。然而,仿射变换不提供任何度量信息,从而导致校准过程无法获得准确性的分析。另一种估计触觉世界到现实世界转

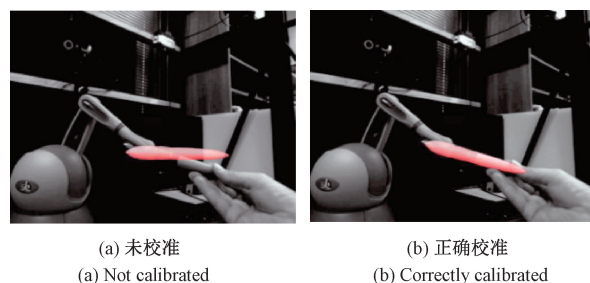


图 2 触觉设备的方向和位置校准

Fig. 2 Orientation and position calibration of the haptic device

换的方法是用外部测量系统来获取测量点。Grant 等^[13]使用测量经纬仪来测量放置在触觉空间中的标识的位置。但该方法获得触觉校准的精度低,误差达到 1.5 cm。为了提高触觉设备的位置精度,研究人员通过校正来自网格点测量的位置误差。Reinig 等^[14]使用平面校准网格来校正触觉位置,并将该校正扩展到整个触觉空间,但结果表明,随着触觉设备执行器尖端离开网格,位置误差将逐渐增大。Ikits 等^[15]提出了一种改进的平面校准网格方法,在触觉工作空间中放置两个垂直的平面网格。文献[16-17]均采用高精度的跟踪装置来定位两个坐标系之间的变换矩阵,这种方法具有较高的精度,但设备经济成本高。鹿珂珂等^[18]使用视觉传感器,并采用非线性优化的方法来提高定位精度,但视觉传感器容易受外部环境影响。

在以往 VHAR 技术研究中,实现视触觉交互采用是非共址定位的方法^[19-20]。如图 3(a)所示,非共址定位是将触觉交互点从触觉空间转换到图像空间坐标系中,最终在屏幕上呈现的是触觉交互点(蓝色光标点)与虚拟物体同步注册到标识上的场景,此时用户手持触控笔便可实现对虚拟交互点操控,进而实现对虚拟物体进行协同运动。但此方法缺点在于视觉和触觉信息以一种分开方式呈现从而削弱虚实触觉交互的真实感。本文提出一种协同共址定位方法如图 3(b)所示,将触觉设备集成到增强现实环境中,触觉交互点与三维真实场景中的接触交互点在视觉上重合,构成一种以同步的方法感知视觉和动态触觉刺激的视触觉增强现实方法。此时,用户不仅可以触摸到存在于真实世界中的虚拟对象,而且用户的肢体可以伴随虚拟物体运动并接受来自虚拟物体的触觉反馈^[21-22]。

本文针对传统桌面 AR 的弊端,使用 VHAR 技术允许用户以协同共址定位方式来感知视觉、画面和动觉刺激,即用户可以在同一空间位置看到自己手持着虚拟交互工具与虚拟对象进行交互。为了解决视觉增强现实注册虚拟物体稳定性差,本文提出的基于 Marker-SLAM 跟踪注册算法,有效地解决虚拟物体注册不稳定以及

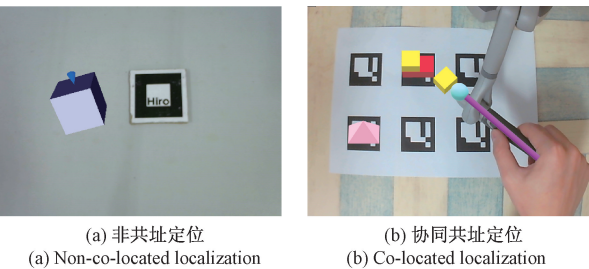


图3 VHAR 定位交互

Fig. 3 VHAR localization interaction

真实维度不匹配。针对视觉和触觉无法满足在时间和空间一致性和触控设备的触觉交互点注册位置不正确问题,本文提出的基于无跟踪器的触控笔尖端姿态优化算法,精确实现了视觉和触觉之间的空间配准和同步感知。

本文方法研究了校准运动学参数的替代策略,该方法不使用任何外部跟踪设备,实验经济成本低并具有较高的精度和总体渲染保真度。

2 系统实现框架

目前视触觉增强现实主要采用基于跟踪器的校准^[16-17],而本文提出一种基于无跟踪器的校准方法。它们的基本思想都是在触觉坐标系和世界坐标系中收集3D点信息,通过获得的信息将虚拟世界中触觉交互点与现实世界中的真实交互点进行协同定位,从而确定两个坐标系之间的刚性变换。两种方法的主要区别在于获取两个坐标系中3D点的方式不同,以及所作用的虚拟交互点的位置不同。

基于跟踪器的视触觉校准,如图4所示。触控笔的HIP位于黑色点A处,外部红外跟踪器(extra tracker, ET)用于跟踪带有附加目标 C_{target} 的相机,第2个跟踪目标 HIP_{target} 连接到触觉设备(haptic device, HD)的触控笔上。作为校准的参考,触觉工作空间 HD_{origin} 和外部跟踪器工作空间 ET_{origin} 之间的空间关系是静态的,外部跟踪器工作空间即世界坐标空间。首先通过棋盘法确定相机内在参数,并估计 C_{target} 相机坐标系之间的6-DOF变换。实验使用初始化3D Systems Touch 触觉设备,并将跟踪

目标附加到触控笔上。通过枢轴校准定理确定标记尖端的平移,从而获得世界(即跟踪器)坐标系中触觉交互点的3D信息。坐标系变换是首先将触控笔尖端固定在空间中,然后在记录标记姿势的同时围绕固定点以球形运动旋转整个组件来获得,最佳拟合球体的半径提供触觉渲染点相对于标记的距离。最后在两个坐标系中收集三维点测量数据,根据这些数据,可以确定世界坐标系和触觉坐标系之间的刚性变换。

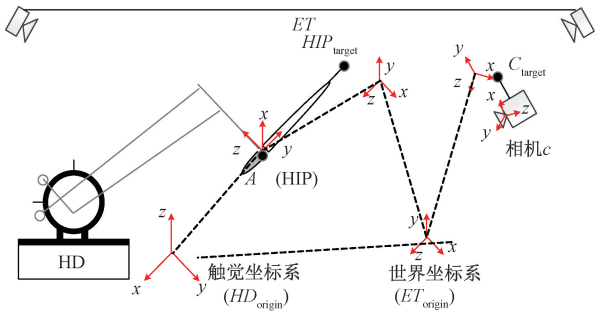


图4 基于跟踪器的 VHAR 工作空间校准

Fig. 4 Tracker-based VHAR workspace calibration

图5所示是无跟踪器的视触觉校准。其校准的难点不在于刚性变换的计算,而在于输入点的采样和测量。由于实际的HIP位于触觉设备手臂 L 与触控笔的结合处,在无外部传感器的条件下很难获取采样点 P_i^w (在世界坐标系获取的采样点)。而采样点 P_i^h (在触觉坐标系获取的采样点)可以通过设备直接得出。所以本文采用将HIP进行姿态优化算法变换到红色点B处(触控笔笔尖),在此方法下,数据的采集是在触控笔的尖端获得。此种方法有利于获取世界坐标系的采样点 P_i^w ,即通过人工设置的已知世界坐标系(一组有4个标识构成 $x-y$ 平面,本文世界坐标系即标识坐标系),通过姿态优化算法间接获取采样点 P_i^w ,而无需外部传感器进行贴标记。最后在优化中必须包括触控笔尖端到后者的偏移量,以及两个万向节角度偏移量,并对两阶段的误差优化,将优化后的参数使用LM(Levenberg-Marquardt)算法进行非线性优化。

如表1所示,将两种方法从校准组件、主要特征和优缺点这3个方面进行对比分析。

表1 两种方法对比

Table 1 Comparison of two methods

方法	校准组件	主要特征	优缺点
基于跟踪器的视触觉校准	触觉设备、外部跟踪、附加标记、相机	需要外部跟踪设备定位两个坐标系的采集点	校准精度高,延时率低;设备经济成本高,实验复杂性高
基于无跟踪器的视触觉校准	触觉设备、人工标识、相机	通过触控笔姿态优化算法获取采集点	实验应用简单,具有较高的渲染保真度;校准精度仅略减低

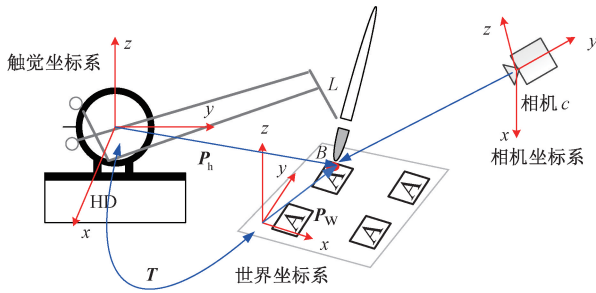


图5 基于无跟踪器的 VHAR 工作空间校准

Fig. 5 Tracker-less-based VHAR workspace calibration

3 跟踪注册算法

目前,视觉增强现实系统视觉环境搭建主要有两种方法,基于标识方法和基于自然特征点方法。标识法是通过标识的4个角来估计相机位姿,但标识容易被遮挡,导致注册失败。而基于自然特征点搭建的增强现实环境,容易受光照、相邻帧逐步跟踪误差累积以及关键帧时域一致性差等因素影响,导致注册的虚拟物体抗干扰性差。吴国新等^[23]采用 Harris 角点检测算法,虽有效改善光强变化的影响,但对于室外复杂的环境尚未考虑。最近,同步定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术在 AR 领域取得重大突破,但由于 SLAM 建立的世界坐标系是随机的,因此无法确定所构建点云世界坐标,且单目 SLAM 所构建的尺度信息是无法确定的,其建立的世界坐标系不具有真实的比例尺寸。在增强现实应用中,虚拟模型不能与其真实度一起设置,此外世界参考不能根据人为需要设置,所以不能预先设置虚拟模型的姿态,而 AR 是为了实现真实与虚拟物体的协调融合,在现实环境中还原真实物体的比例尺度。所以本文提出一种基于 Marker-SLAM 的视觉增强现实,原理流程如图6所示。首先人工设置一个已知的二维码标识(ARTag),并以此为基础建立一个已知世界坐标系,使得标识坐标系和 SLAM 所构建世界坐标系进行统一。通过计算从标识到相机的姿态变换,得到初始地图点和初始关键帧在真实尺度下的位姿之后,在此坐标系的基础上通过 SLAM 跟踪,完成具有真实尺度的虚拟物体的注册。

本文算法采用基于快速特征点提取和描述的 SLAM 系统(oriented FAST and rotated BRIEF SLAM, ORB-SLAM)初始化,如图7(a)所示,基于 ORB 的 Marker-SLAM 初始化思想方法的拓展如图7(b)所示。首先,为了有足够的匹配点,在初始帧 F_i 和当前帧 F_c 中提取1 500个特征点。 T_{cw} 表示在初始帧 F_i 和当前帧 F_c 两帧之间的位姿。本文只考虑初始场景为平面的情况,根据式(1)得到平面场

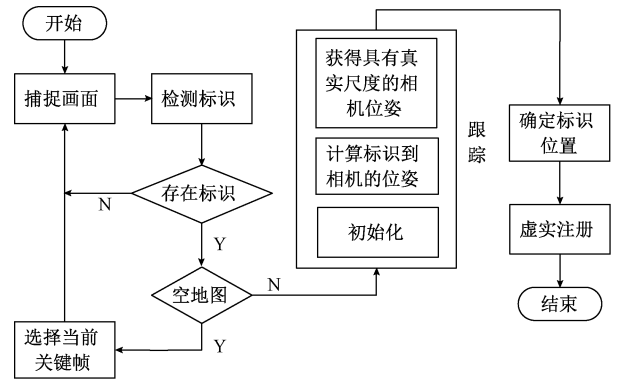


图6 基于 Marker-SLAM 的视觉增强现实流程

Fig. 6 Visual augmented reality flowchart based on Marker-SLAM

景的单应性矩阵 H_{cw} 。

$$p_c = H_{cw} p_i \quad (1)$$

式中: p_i 、 p_c 分别表示初始帧 F_i 和当前帧 F_c 中的特征点。然后根据单应性矩阵 H_{cw} 分解求得 T_{cw} 。求解相机相对于标识的位姿 T_{cm} 方法如下。

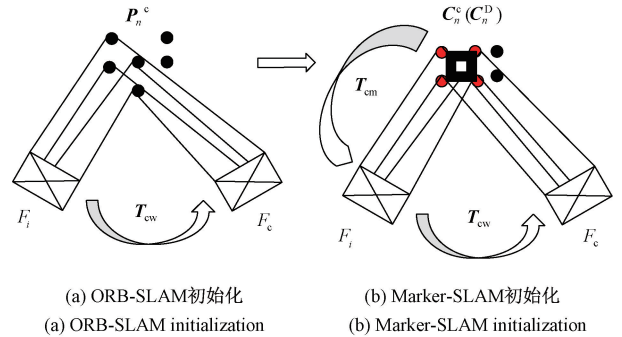


图7 从 ORB-SLAM 到 Marker-SLAM 初始化

Fig. 7 From ORB-SLAM to Marker-SLAM initialization

首先本文采用 ARTag 标识进行检测,最后得到标识在图像坐标系中的映射的4个像素点坐标。之后采用 PnP 进行标识到相机的位姿 T_{cm} ,如果准确测量标识的边长,则获得的标识位姿具有真实的比例。 C_n^i 表示在基准标记坐标系下标记的4个角的坐标。 p_x^i 表示投影到图像平面的4个角点的像素坐标。相机、图像和标识坐标系(世界坐标系)之间的转换,如图8所示。

对于相机坐标系来说,相机坐标系中的一个点在图

$$\text{像上的投影取决于相机的内参矩阵 } K = \begin{bmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 其}$$

中 f_x 和 f_y 表示相机沿 x 和 y 轴的有效焦距, $c = [c_x, c_y]^T$ 表示相机的中心点, s 表示是 x 和 y 轴的不垂直尺度因子。用 p 表示图像坐标系中的二维点 (u, v) 。使用二维点 q

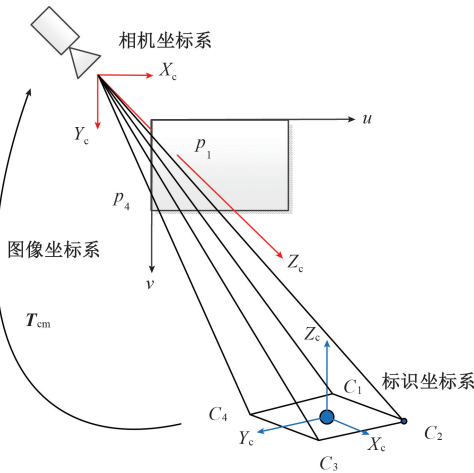


图8 各坐标系之间的转换

Fig. 8 Conversion between coordinate systems

作为其归一化的坐标位置,如式(2)所示。

$$\mathbf{q} = \mathbf{K}_{2 \times 2}^{-1}(\mathbf{p} - \mathbf{c}) \quad (2)$$

设 m 为标识平面的二维坐标点,式(3)表示从标识平面到图像平面的齐次系统描述。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ 1 \end{bmatrix} \propto \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & 0 \\ \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \propto \mathbf{H}_{\text{cm}} \begin{bmatrix} m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,旋转矩阵 $\mathbf{R} \in SO_3$, $\mathbf{R} = [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2]$ 。

平移矩阵 $\mathbf{t} \in \mathbb{R}^3$ 是将标识坐标中的点映射到相机坐标系的一种刚性变换矩阵。 $\mathbf{H}_{\text{cm}}$ 是标识坐标系变换为归一化的相机坐标系的 3×3 单应性矩阵,且 $\lambda \mathbf{H}_{\text{cm}} = \mathbf{K}[\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{t}]$ 。

使用投影函数 $\pi([x, y, z]^T) = z^{-1}[x, y]^T$, 将相机坐标系中 3D 点坐标转换为图像坐标系中 2D 点坐标。令 $s(m) = \mathbf{R}[m^T, 0]^T + \mathbf{t}; \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$, $s(u)$ 表示从标识坐标系上的点变换到归一化相机坐标系中的非齐次 2D 点坐标的函数, m 为标识平面的二维坐标点的坐标。然后将 $s(m)$ 与投影函数 π 复合得到从标识平面上的点变换到图像坐标系中的变换函数 w , 如式(4), (其中, $(\pi \circ s)(m)$ 表示复合函数, 记作 $(\pi \circ s)(m) = \pi(s(m))$ 。

$$w(m) = (\pi \circ s)(m) \quad (4)$$

接着用 $\mathbf{J}$ 表示计算雅可比矩阵的函数。对式(4)两边的推导得到:

$$\mathbf{J}_{w(m)} = (\mathbf{J}_{\pi} \circ s)(m) \mathbf{J}_s(m) \quad (5)$$

由于 $\mathbf{J}_s(m) = \mathbf{R}_{3 \times 2}$ 是刚性变换矩阵, 所以得到 $\mathbf{J}_s(m)^T \mathbf{J}_s(m) = \mathbf{I}$ 。其中 $\mathbf{I}$ 表示 2×2 的单位矩阵。通过对上式求解偏微分方程来估计式(3)中的 $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{t}$, 最后得到 $\mathbf{T}_{\text{cm}}$ 。

为了获取具有真实尺度的相机位姿, 需要对两帧图像 F_i, F_e 检测特定标识。首先检测初始帧 F_i 中的标识,

并计算从标记中心到 F_i 的变换。然后将执行基于特征点的初始化。同样, 在下一帧 F_e 中也需要对标识进行检测。这样就保证了标识的 4 个角都能获得 SLAM 初始世界坐标中的 3D 坐标, 如图 7(b) 所示。使用 $\mathbf{C}_n^M$ 来表示标识坐标中 4 个角点的 3D 坐标。当在初始帧 F_i 中检测到标识时, 从标识到 F_i 的位姿 $\mathbf{T}_{\text{cm}}$ 便可求解得出。4 个角 $\mathbf{C}_n^M$ 的位置可以从标识坐标系转换到初始帧的相机坐标系, 此时, $\mathbf{C}_n^C$ 表示相对于标识的地图点, 且该地图点具有真实的深度信息, 其中 $1 \leq n \leq 4$ 。

$$\mathbf{C}_n^C = \mathbf{T}_{\text{cm}} \begin{bmatrix} \mathbf{C}_n^M \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_n & Y_n & Z_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

当初始帧检测到标识时, 在标识检测和位姿估计过程中通过线性回归获得 4 个角的像素图像坐标。使用 $\mathbf{q}_i'$ 表示在 F_i 中观察到的地图点的图像坐标, $\mathbf{q}_n^i$ 是在 F_i 中检测到的标识图像坐标的 4 个角。通过比较 $\mathbf{q}_i'$ 和 $\mathbf{q}_n^i$ 之差的 L2 范数可得到在相机坐标系下具有相对尺度坐标的地图点 $\mathbf{C}_n^D(X_d, Y_d, Z_d)$, $1 \leq d \leq 4$, 此时将 $\mathbf{C}_n^C$ 中 Z_n 和 $\mathbf{C}_n^D$ 中 Z_d 进行比值运算, 得到尺度因子 γ , 将两帧之间的平移向量乘上尺度因子 γ , 得到初始地图点和初始关键帧在真实尺度下的位姿。

最后只需要将求得上述求得 $\mathbf{T}_{\text{cm}}$ 右乘基于 ORB 的 SLAM 初始化求得的 $\mathbf{T}_{\text{cw}}$, 修正得到具有真实尺度的相机位姿 $\mathbf{T}_{\text{true}}$, 如式(7)所示。

$$\mathbf{T}_{\text{true}} = \mathbf{T}_{\text{cw}} \cdot \mathbf{T}_{\text{cm}} \quad (7)$$

根据增强现实系统相机模型矩阵推导^[24], 得到从标识坐标系到图像坐标系的变换公式:

$$\begin{bmatrix} hu \\ hv \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{d_x} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{d_y} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P}_m \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_m \begin{bmatrix} V_{3 \times 3} & \mathbf{W}_{3 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P}_m \mathbf{T}_{\text{cm}} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中, (X_c, Y_c, Z_c) 表示相机坐标系中一点, (X_w, Y_w, Z_w) 表示标识坐标系中一点, 默认标识坐标系为世界坐标系。 f 为相机的焦距; h 为比例因子; (u, v) 像素坐标点; d_x, d_y 表示在 x 轴和 y 轴上实际长度; (u_0, v_0) 表示图像坐标系中心点像素坐标以及 $\mathbf{P}_m$ 表示相机固定物理参数矩阵。最后根据式(7)和(8), 得到基于 Marker-SLAM 的增强现实跟踪注册算法的转换公式:

$$\begin{bmatrix} hu \\ hv \\ h \end{bmatrix} = \mathbf{P}_m \begin{bmatrix} \mathbf{V}'_{3 \times 3} & \mathbf{W}'_{3 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P}_m \mathbf{T}_{\text{true}} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

4 视觉觉增强现实空间的融合

触觉空间的校准是将触觉空间坐标系和世界坐标系进行对齐,对 HIP 进行姿态优化从而将触觉交互点变换到触控笔尖端,在这种情况下,数据的采集是在连接的触控笔的尖端获得的。此种方法有利于获取世界坐标系的采样点 P_i^w ,即通过人工设置的已知世界坐标系(一组有 4 个标识构成 $x-y$ 平面)获取触控笔尖端三维点的信息(此时人工设置的世界坐标系上的采样点是事先人为设置的已知三维坐标位置),同时通过触觉设备获得触觉空间坐标系的采样点 P_i^h 。根据两个坐标系的信息,从而估计两个坐标系之间刚性变换,将触觉空间坐标系对齐到世界坐标系。最后完成触觉空间坐标系 $\rightarrow$ 世界坐标系 $\rightarrow$ 相机坐标系 $\rightarrow$ 图像坐标系的转换,完成视觉觉空间的融合,如图 9 所示。

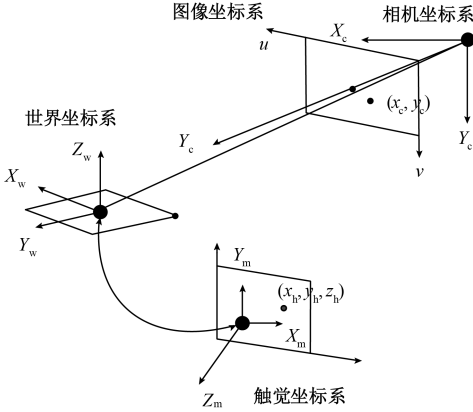


图 9 视觉觉空间转换

Fig. 9 Visuo-Haptic space conversion

根据转换关系构建数学表达式,如下:

$$P_i^w = R_{3 \times 3} \cdot P_i^h + t_{3 \times 1} \quad (10)$$

其中,旋转矩阵 $R_{3 \times 3}$ 和平移向量 $t_{3 \times 1}$ 表示触觉坐标系 H 和世界坐标系 W 之间的刚性变换。通过式 (11) 求解最佳刚性变换两个点集之间的最小化距离误差,其中 $1 \leq i \leq N$ 。

$$\min_{R,t} \sum_{i=0}^N \|P_i^w - R_{3 \times 3} \cdot P_i^h - t_{3 \times 1}\| \quad (11)$$

为了实现真实的 6-DOF 交互,理想的运动学模型与其实际运动存在额外的误差。因此,校准过程中必须包括对设备运动学模型进行方向和位置校准。

4.1 触觉设备的方向和位置校准

为了减少理想运动学模型和实际运动之间的误差,因此要对触觉设备运动学模型参数进行校正优化。触觉设备正运动学模型,如图 10 所示,其中 $l = (l_1, l_2)$ 是设备的臂长, $\theta_{ja} = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 是设备关节的角度, P_{HIP} 表示触

觉空间中触觉交互点 HIP 的实时平移位置,根据运动学模型进行式 (12) 推导^[25]。

$$P_{HIP}(\theta_{ja}, l) = \begin{bmatrix} \sin\theta_1(l_1\cos\theta_2 + l_2\sin\theta_3) \\ l_2 - l_2\cos\theta_3 + l_1\sin\theta_2 \\ -l_1 + \cos\theta_1(l_1\cos\theta_2 + l_2\sin\theta_3) \end{bmatrix} \quad (12)$$

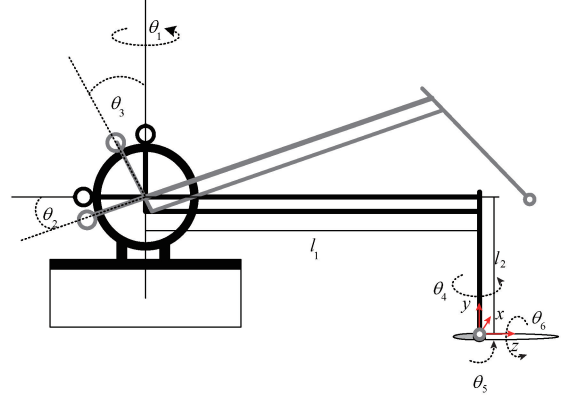


图 10 触觉设备正向运动学模型

Fig. 10 Forward kinematics model for the haptic device

推导得出第 2 个手臂 l_2 方向位置,得出:

$$R_{123}(\theta_{ja}) = R_1 R_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1\sin\theta_3 & \sin\theta_1\cos\theta_3 \\ 0 & \cos\theta_3 & \sin\theta_3 \\ -\sin\theta_1 & -\cos\theta_1\sin\theta_3 & \cos\theta_1\cos\theta_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据图 10 进一步推导万向架传感器测量的旋转角 $\theta_{ga} = (\theta_4, \theta_5, \theta_6)$ 可表示:

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \theta_4, R_5 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, -\theta_5, R_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, -\theta_6 \quad (14)$$

其中, (v, θ) 表示绕 v 轴旋转的角度为 θ 。因为旋转的位姿是串联的关系,所以构成了一个完整的旋转角 R_{HIP} , 推导得出:

$$R_{HIP}(\theta_{ja}, \theta_{ga}) = R_{123} R_4 R_5 R_6 \quad (15)$$

最终得到具有 6-DOF 的触控笔交互位姿。

$$T_{pose}^{HIP}(\theta_{ja}, \theta_{ga}, l) = \begin{bmatrix} R_{HIP} & P_{HIP} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

4.2 基于无跟踪器的触控笔尖端姿态优化算法

基于无跟踪器的触控笔尖端校准的关键是对已知的触控笔笔尖进行位置约束。通过使用一组物理平面进行约束:当触控笔笔尖在平面上移动时,记录设备获得的编码器值,然后通过 s 平面上的测量值给出最小化的误差 ε ,

如式(17)所示。

$$\varepsilon = \sum_s \sum_j (\delta(T^{\text{tip}}))^2 \quad (17)$$

通过 s 平面的 j 个约束条件对应的测量点, δ 给出1个点到 j 的最佳拟合平面的距离。在这种情况下, 测量信息是触控笔在笔尖处获得而不是在 HIP 处获得。因此, 优化中必须包括笔尖相对于触觉交互点的偏移量 Δtip 以及两个万向节偏移 γ_4 和 γ_5 (图 11)。笔尖优化的正向运动由式(17)推导给出, 由式(18)、(19)联立推导得到式(20), 具有 6-DOF 的触控笔笔尖优化交互位姿 $T_{\text{tip-pose}}^{\text{HIP}}$

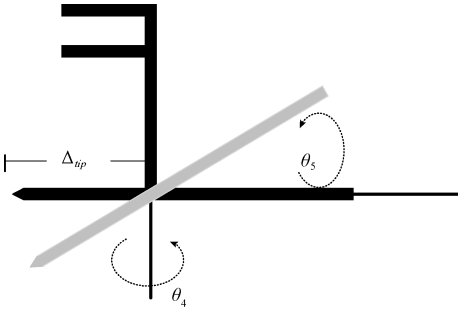


图 11 触控笔笔尖姿态优化

Fig. 11 Stylus tip attitude optimization

$$R^{\text{tip}} = R_{\text{HIP}}(0, 0, -\Delta tip)^T \quad (18)$$

$$P^{\text{tip}} = P_{\text{HIP}} + R^{\text{tip}} \quad (19)$$

$$T_{\text{tip-pose}}^{\text{HIP}} = \begin{bmatrix} R^{\text{tip}} & P^{\text{tip}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中, 触控笔旋转角 R_{HIP} 的方向通过围绕关节和万向节轴线连续旋转来确定的。制造商提供的编码器定标和臂长的参考值是足够精确的, 因此可以通过固定这些值来减少优化问题。此外, 在解决绝对定向问题时, 可以获得设备装置底座周围的角度偏移量。因此, 本文只校准真实复位配置和假设复位配置之间的关节角度偏移 $\gamma_{2,3,4,5,6}$ 以及笔尖偏移量 Δtip 。

关节角度是从编码器读数 $\eta_{1,2,3}$ 相对于复位位置获得的。因此, 需要引入角度偏移量 $\gamma_{1,2,3}$ 来补偿真实复位位置的误差, 以及通过编码器读数得到关节角增益 $k_{1,2,3}$ 的转换值, 如式(21)所示, 其中 k 是关节角增益量, k 等于编码器的直径与关节齿轮的比值, $i = 1, 2, 3$ 。

$$\theta_i = k\eta_i + \gamma_i \quad (21)$$

将式(21)代入式(12)得到式(22), 其中 $\phi = (k, \gamma, l_1, l_2)$ 。

$$P_{\text{HIP}}^i(\eta_i, \phi) = g(\theta(k, \eta_i, \gamma), l_1, l_2) \quad (22)$$

设 P_i^w 对应世界坐标系的点集。为了调整点集, 算法遵循两阶段优化。在第1阶段中, 基于式(11)最小化方法来求解绝对定向问题, 这一步通过初始值 ϕ 来确定 R 和 t 的值。第2阶段, 通过调整 ϕ 的参数(式(23)), 使残

差函数 $r(\phi)$ 最小, 来进行关节角修正。

$$r(\phi) = \min_{R, t} \sum_{i=0}^N \|P_i^w - R_{3 \times 3} \cdot P_{\text{HIP}}^i(\eta_i, \phi) - t_{3 \times 1}\| \quad (23)$$

$$\phi^* = \operatorname{argmin} r(\phi) \quad (24)$$

因此, 通过求解式(24)可以得到最优修正参数 ϕ^* , 两阶段过程交替迭代, 直到残差降到给定阈值以下。

最后, 将触觉设备的笔尖正向优化运动模型映射到基于 Marker-SLAM 的增强现实的空间中, 最终得出 6-DOF 的视触觉增强现实交互公式, 如式(25)所示。

$$\begin{bmatrix} hu \\ hv \\ h \end{bmatrix} = P_m \begin{bmatrix} V'_{3 \times 3} & W'_{3 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^{\text{tip}} & T^{\text{tip}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_h \\ Y_h \\ Z_h \\ 1 \end{bmatrix} = P_m T_{\text{true}} T_{\text{tip-pose}}^{\text{HIP}} D_{4 \times 4} \begin{bmatrix} X_h \\ Y_h \\ Z_h \\ 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

其中, $(X_h, Y_h, Z_h)^T$ 表示触觉空间中一点, $D_{4 \times 4} =$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{表示视触觉空间坐标轴匹配转换矩阵。}$$

5 实验结果与分析

5.1 跟踪注册算法误差、实时性和准确性分析

本次实验测试平台是 Inter(R) Core(TM) i7-2600 CPU @ 3.2 GHz、ARTag 标识、USB 相机、3D Systems Touch 触觉设备, 在 Visual Studio 2017 环境下搭建基于 Marker-SLAM 的视触觉增强现实环境。本文实验分别采用经典跟踪算法, 如加速稳健特征算法 (speeded up robust features, SURF) 结合光流跟踪算法 (kanada lucas tomasi, KLT) 的 SURF+KLT、ORB+KLT、ORB-SLAM 和本文算法对前 100 帧图像的特征点进行检测和跟踪, 对各算法的跟踪误差、实时性和准确性进行分析。误差方面采用特征点投影在图像中的估计值和真实观测得到的像素位值的均方差值 d 作为评价标准(式(26))。图 12 所示是在相机运动时得到的特征点与实际值的误差距离均方差值曲线。

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(X_i^1 - X_i^0)^2}}{n} \quad (26)$$

其中, 特征点在图像中的估值为 $X_i^1 (1 \leq i \leq n)$, 特征点在图像中真实观测像素值为 X_i^0 。由折线图可知本

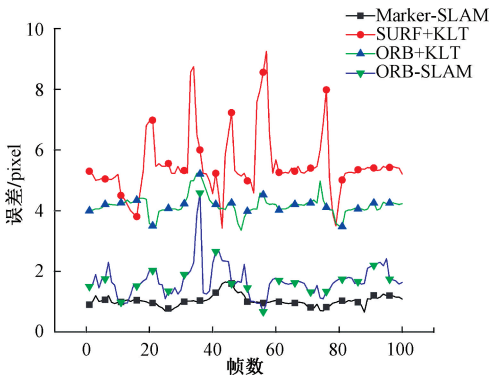


图 12 各算法偏移误差
Fig. 12 Offset error of each algorithm

文算法明显优于其他 3 种算法, SURF+KLT 算法误差最大。由于 SLAM 特征点跟踪方法和标识结合使用, 提高了虚拟物体注册的抗抖动性(稳定性)。

通过采集前 100 帧图像, 分别对第 25、50、75 和 100 帧进行采样, 对图像实时运行的帧率和正确姿态注册的图像数目进行分析。如表 2 所示, 实时性的对比采用对虚拟物体注册过程耗时作为参考指标。如表 3 所示, 准确率的单位采用正确姿态的注册的百分比。

表 2 各算法注册的实时性分析

Table 2 Real-time analysis of each algorithm registration				
ms				
帧数	SURF+KLT	ORB+KLT	ORB-SLAM	本文算法
25	40.2	35.2	19.5	8.5
50	44.3	36.5	20.4	9.2
75	49.5	38.2	21.2	9.8
100	54.2	4.04	23.4	10.4

表 3 各算法注册的准确性分析

Table 3 Accuracy analysis of each algorithm registration				
%				
帧数	SURF+KLT	ORB+KLT	ORB-SLAM	本文算法
25	94.2	95.5	98.5	98.9
50	89.6	89.5	94.5	96.5
75	85.4	87.5	90.6	94.2
100	79.6	81.6	89.5	91.5

由表 2 数据可知, 使用 Marker-SLAM 注册方法在不同帧数条件下平均耗时相比于 SURF+KLT、ORB+KLT 算法和 ORB-SLAM 注册方法运算时间均明显缩短且实时性最高。表 3 数据表明, 本文算法注册的准确率明显高于其他算法, 可以看出本文算法通过额外引入了一个标

识, 不仅可以有效解决前者无法确定点云构建世界坐标系, 而且提高了虚拟物体注册的准确率。

通过一个简单的 AR 演示将本文的 Marker-SLAM 跟踪注册算法与 ORB-SLAM 进行比较。在本文的对比实验中, 可以预先设置虚拟立方体的位置和大小, 立方体被设置在标记的中心, 其边长被设置为 5 cm, 即在两种方法设置中要求虚拟立方体都被放置在具有相同边长参数的相似平面中。采用 ORB-SLAM 方法注册虚拟物体如图 13 所示。由于 ORB-SLAM 尺度信息是无法确定的, 即无法确定点云世界坐标和真实尺寸的比例, 结果如图 13(a) 和(b) 所示。注册虚拟物体要么过小, 要么过大, 且无法确定所在世界坐标系中的位置和方向, 与原始设置比例尺度无关。而采用基于 Marker-SLAM 的跟踪注册方法, 如图 14 所示。图 14(a) 为初始注册时标识示意图, 图 14(b) 为注册在标识上的立方体其大小和位姿与原先设置的位置和大小一致, 14(c) 为遮挡标识一角后准确注册的效果。实验结果表明, 本文方法有效解决标识遮挡时无法注册和虚拟模型不能与真实维度匹配的问题。

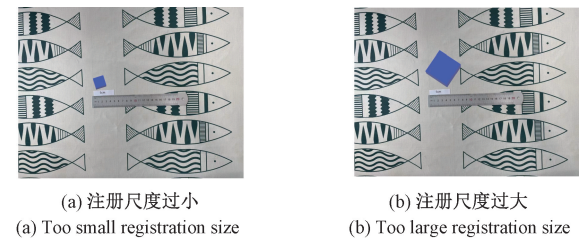


图 13 基于 ORB-SLAM 的虚拟物体注册

Fig. 13 Virtual object registration based on ORB-SLAM

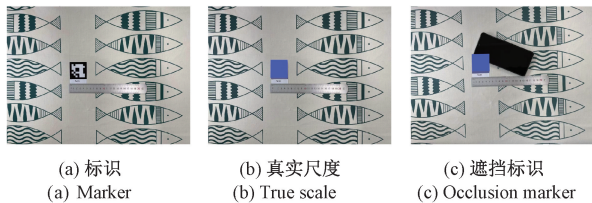


图 14 基于 Marker-SLAM 的虚拟物体注册

Fig. 14 Virtual object registration based on Marker-SLAM

5.2 视觉校准分析

为了评估优化过程的有效性, 估计校准误差的下限值以及确定达到此最小误差所需的测量点数。实验在触觉和世界坐标系中选择 80 个点用来估计的校正参数和判断校准的质量。通过将设备臂移动覆盖整个触觉工作区, 以达到关节角度的极限值。本实验初始时关节角度增益 k 设置为 1, 关节角度偏移量 γ 为 0。

理想触觉测量值和实际跟踪测量值之间的校准距离误差如图 15(a) 所示。结果表明,采用优化算法可以将误差从 4 mm 降低到 2.3 mm,平均误差为 2.3 ± 0.2 mm,结果表明满足实验需求(误差 ≤ 2.5 mm)。此外,根据误差图可以得出至少需要 30 个点才能精确估计校正参数。采用不同测量点所获取关节角偏移值如图 15(b) 所示,可以看出, γ_1 和 γ_2 优化成功,而偏移量 γ_3 优化失败,这是由于关节角 θ_2 和 θ_3 校正还存在误差。然而此方法无法求解出关节角度 θ_1 的任意解,是因为如果要校正角度 θ_1 ,则必须将触觉坐标系从重置位置移动到真实位置。然而,后者位置是未知的,并且不能由尖端位置估计出实际位置。因此,只能优化两个关节角偏移量 γ_1 和 γ_2 。

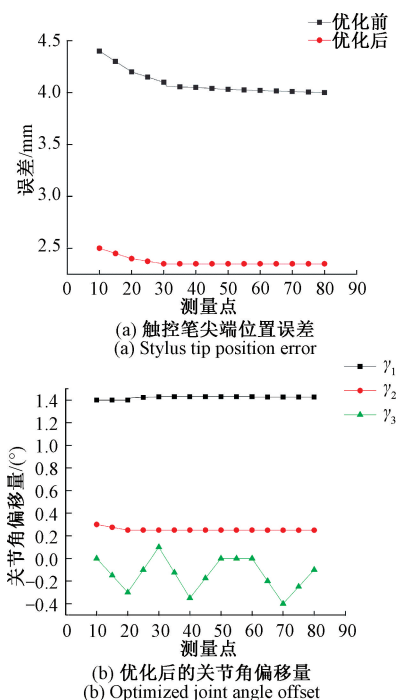


图 15 校正参数

Fig. 15 Correction parameters

优化后采取不同测量点后关节角增益量如图 16 所示,与初始值 γ 为 0 基本一致。从图 6 看出关节角增益 k_1, k_3 略有偏离 1,但通过调整 ϕ 的参数(式(24))两阶段优化,可以使残差函数 $r(\phi)$ 最小,所以结果满足实验要求。

通过对触觉空间的实际测量数据测试该方法的精度。所以本实验使用了一个人工制作的校准组件,由两个 $20 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 大小的正交平面组成,两个平面被放置在触觉工作空间的基台上。除此外还提供了第 3 个正交面(绿色平面),设置如图 17 所示。

为了充分满足实验精度,在每个平面上采集 140 个任意点,并随机地将其分为校准集和评估集,每个集由

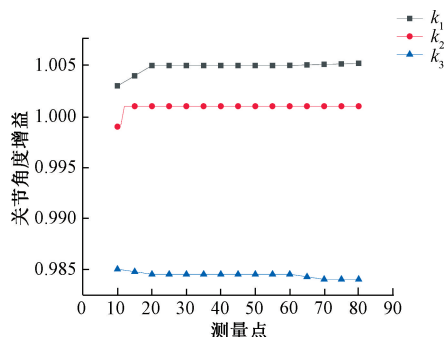


图 16 优化后的关节角增益

Fig. 16 Optimized joint angle gain

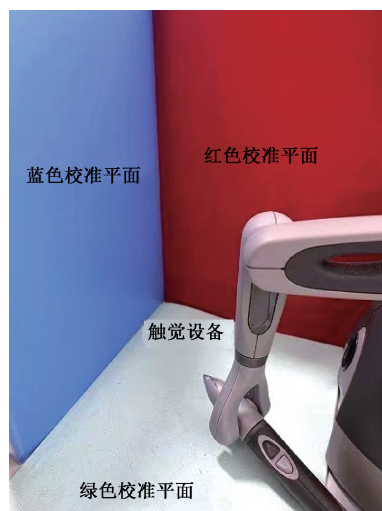


图 17 平面校准设置

Fig. 17 Plane calibration settings

70 个点组成。通过前两个校准平面优化得到的设备参数,用第 3 个校准平面进行了误差评估。测试了两个不同的重置位置,初始化位置和随机放置在工作空间中位置。在通过平面校准之后,首先测试评估集的结果,参数优化后数据点的位置如图 18 所示,从数据集中提取的最佳拟合平面是正交的,平均角度误差在 0.5° 以下。数据点相对于对齐平面的平均偏移量小于 0.6 mm ,进一步检验了在完整工作空间中的位置精度。这便是通过使用无跟踪器技术在整个工作空间中随机收集测试点获得参数,并将得到的校正位置与跟踪器数据进行比较,数据表明实现了工作空间的对齐。

5.3 视触觉融合交互实验

为验证算法对视触觉空间融合的可行性,本节实验在优化过程前后,分别在世界坐标系框架中绘制了 160 组 3D 对应点,如图 19 所示。通过 origin 2018 绘制 3D 点云图,红色正方体代表世界坐标系下测量点,蓝色球体代表触觉坐标系下触觉数据点经过视触觉转换公式

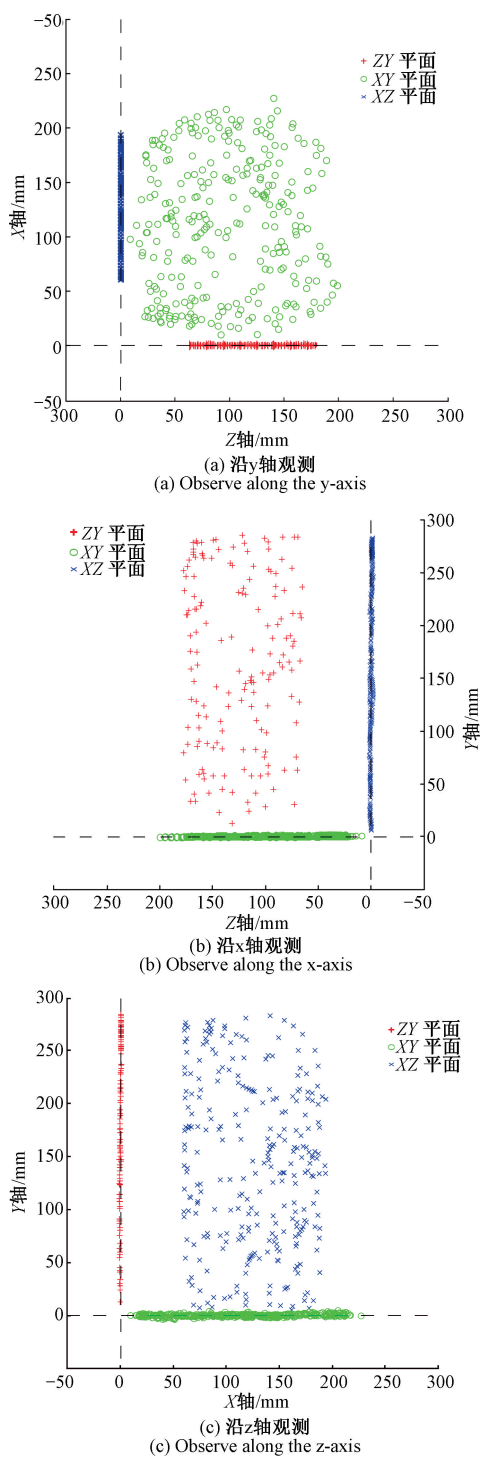


图 18 修正后的数据点在评估集中的位置
Fig. 18 The position of the corrected data point in the evaluation set

归一化到世界坐标系下的 3D 点集。图 19(a) 为未对触觉设备进行结构优化的测量误差图,而图 19(b) 是进行结构优化后的两组配对点,实验数据表明配准误差明显缩小,实现了触觉空间坐标系配准到世界坐标系。

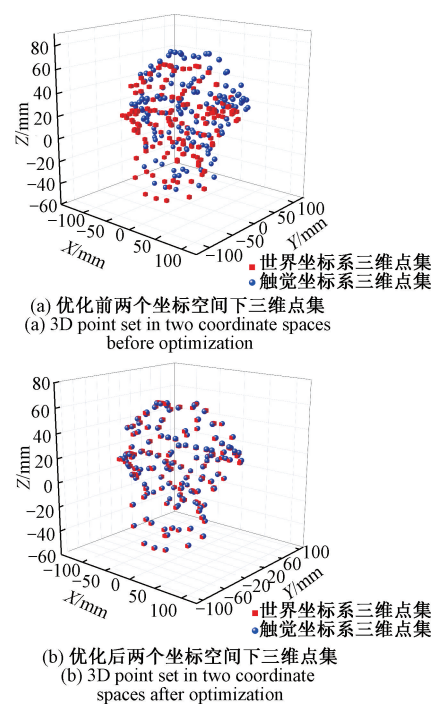


图 19 世界坐标系和触觉坐标系中的三维点集
Fig. 19 3D point set in the world coordinate system and the haptic coordinate system

本文基于 Marker-SLAM 的视触觉增强现实算法完成对触控笔的跟踪注册,实现视触觉空间的融合,注册场景的初始化效果如图 20(a) 所示。对真实触控笔的虚拟注册如图 20(b) 所示,将虚拟笔注册到真实的触控笔上。注册的虚拟笔充当虚拟交互工具作用,准确地注册虚拟交互工具可以精确实现视觉和触觉之间的空间配准和同步感知。图 20(c) ~ (d) 所示为用户手握真实的触控笔进行 6-DOF 运动,虚拟笔可以实时跟踪真实触控笔的姿态

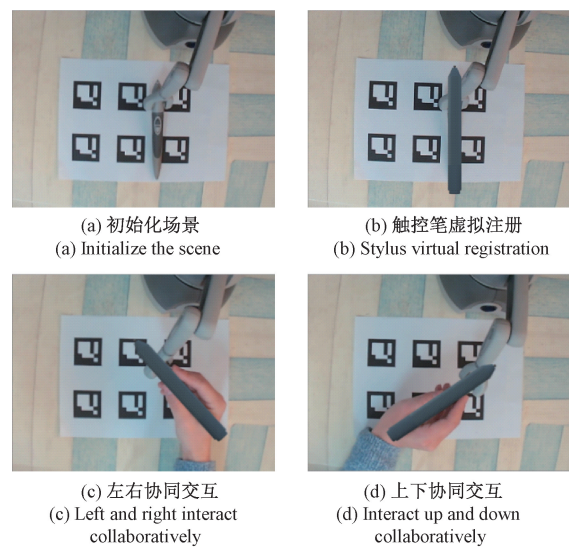


图 20 视触觉增强现实注册算法
Fig. 20 Visuo-Haptic Augmented Reality registration algorithm

态,渲染真实的操作场景,形成了一种在视觉和触觉上的协同定位。

为了验证本文算法的有效性,在前面实验基础上,设计一项视触觉综合交互实验,此时触觉设备被赋予无力反馈、恒力反馈和弹性力反馈 3 种模式。为了更好地模拟虚拟物体之间的交互,本次实验借鉴九孔柱训练方式并以弹性力反馈为例,实验用到 3 种虚拟训练工具,分别为套柱、套圈和套杆,套圈规则是用户通过触控笔上按钮捏住套圈并移动至套柱松开按钮将套圈放入套柱,此时 3 种虚拟物体被赋予物理引擎——重力元素和摩擦力。3 种虚拟物体采用 3DS MAX 软件绘制,如图 21 所示。首先基于标识实现对真实触控笔的虚拟注册如图 21(a)所示。图 21(b)为用户手握着虚拟套杆,此时用户可以明显感受到虚拟套杆的重力感,并在实验操作场景中进行 6-DOF 协同运动。图 21(c)为手握虚拟套杆,对虚拟套圈进行拾取时,可明显感受到来自虚拟套圈的反作用力和两者之间的相互摩擦力,选择套柱进行套圈时,松开触控笔上按钮,虚拟套圈受重力作用做自由落体运动落入到套柱中。图 21(d)为虚实交互结束后场景最终效果图。实验结果表明,本文方法允许用户以一种协同的方式感知视觉和触觉刺激,将用户的手与虚拟工具的视觉和触觉相结合,提高了多模态感官,使交互运动更加自然、真实。

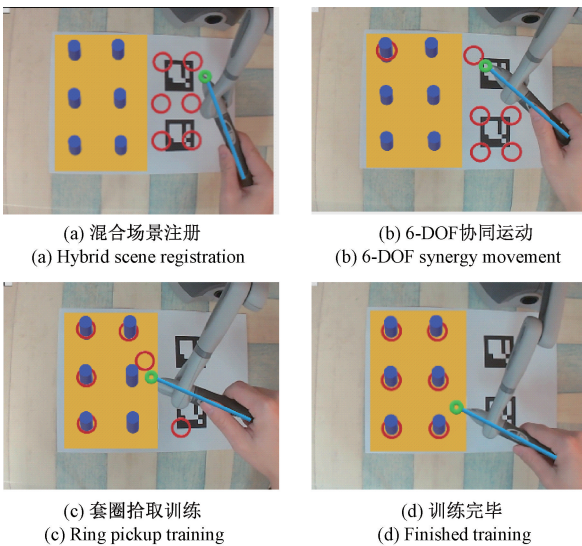


图 21 基于 Marker-SLAM 的视触觉增强现实综合交互实验
Fig. 21 Comprehensive interactive experiment of visuo-haptic augmented reality based on Marker-SLAM

6 结 论

本文提出了一种基于 Marker-SLAM 的视触觉增强现实交互算法。针对传统方法本文主要提出两个创新

点:1)提出了基于 Marker-SLAM 跟踪注册算法,有效解决了相机无法移动、虚拟物体注册稳定性差、虚拟模型不能与其真实维度匹配的问题;2)提出了一种基于无跟踪器的触控笔尖端姿态优化算法,较好地满足视觉和触觉在时间和空间上的一致性,完成了视觉和触觉之间的空间配准和同步感知。该方法精准地校准了触觉空间坐标系和世界坐标系,实现从触觉空间坐标系到世界坐标系到相机坐标系到图像坐标系的转换,最终完成视触觉空间的融合。实验结果表明,该方法具有较高的实时性、稳定性和精度。但本文方法尚未考虑人手和虚拟物体间的虚实遮挡问题,下一步还需正确处理真实物体与虚拟物体之间的遮挡。此外该方法只适用于单手操作,尚未考虑到双手操作,后期将完善更加真实丰富的双手训练。

参考文献

- [1] COSCO F, GARRE C, BRUNO F, et al. Visuo-haptic mixed reality with unobstructed tool-hand integration [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2013, 19(1): 159-172.
- [2] ZHAO L, LIU Y, SONG W. Tactile perceptual thresholds of electrovibration in VR [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2021, 27(5): 2618-2626.
- [3] GROEN J, WERKHOVEN P J. Visuomotor adaptation to virtual hand position in interactive virtual environments [J]. Presence, 1998, 7(5): 429-446.
- [4] MILANOVA M, ALDAEIF F. Markerless 3D virtual glasses try-on system [C]. New Approaches for Multidimensional Signal Processing, Springer, 2021: 99-111.
- [5] MCANALLY K, WALLIS G. Visual-haptic integration, action and embodiment in virtual reality [J]. Psychological Research, 2021, DOI: 10.1007/s00426-021-01613-3.
- [6] PROSKE U, CHEN B. Two senses of human limb position: Methods of measurement and roles in proprioception [J]. Experimental Brain Research, 2021, 239(11): 3157-3174.
- [7] PREISLER L, JOVANOVIĆ B, MUNZERT J, et al. Effects of visual and visual-haptic perception of material rigidity on reaching and grasping in the course of development [J]. Acta psychologica, 2021, 221:

- 103457.
- [8] SALVATO M, HERAVI N, OKAMURA A M, et al. Predicting hand-object interaction for improved haptic feedback in mixed reality [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(2): 3851-3857.
- [9] HAOMING L, WANTING H, ZHANPING F. Overview of the development of video see through technology in mixed reality technology and simulation application [C]. IEEE 3rd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT), 2021: 609-613.
- [10] LI J, ITO A, YAGUCHI H, et al. Simultaneous kinematic calibration, localization, and mapping (SKCLAM) for industrial robot manipulators [J]. Advanced Robotics, 2019, 33(23):1225-1234.
- [11] ECK U, PANKRATZ F, SANDOR C, et al. Comprehensive workspace calibration for visuo-haptic augmented reality [C]. IEEE International Symposium of Mixed and Augmented Reality, 2014: 104-109.
- [12] VALLINO J, BROWN C. Haptics in augmented reality [C]. Proceedings IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems, 1999: 195-200.
- [13] GRANT B, HELSER A, TAYLOR R M. Adding force display to a stereoscopic head-tracked projection display [C]. Proceedings IEEE 1998 Virtual Reality Annual International Symposium, 1998: 81-88.
- [14] REINIG K, TRACY R, GLIMORE H, et al. Some calibration information for a PHANTOM 1.5 A [C]. Proceedings PHANTOM User Group Workshop, 1997: 148-153.
- [15] IKITS M, HAMSEN C D, JOHNSON C R. A comprehensive calibration and registration procedure for the visual haptic workbench [C]. Proceedings of the Workshop on Virtual Environments, 2003: 247-254.
- [16] BAE Y, CHA B, RYU J. Calibration and evaluation for visuo-haptic collocation in haptic augmented virtuality systems [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2020, 18(5): 1335-1342.
- [17] BISWAS S, VISELL Y. Haptic perception, mechanics, and material technologies for virtual reality [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31 (39): 2008186.
- [18] 鹿珂珂, 刘陵顺, 寇昆湖, 等. 不依赖精密转台的 MEMS-IMU 误差标定补偿方法 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 129-136.
- LU K K, LIU L SH, KOU K H, et al. MEMS-IMU error calibration compensation method independent of precision turntable [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 129-136.
- [19] 张晶晶. 面向上肢功能康复的视触觉增强现实系统研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
- ZHANG J J, Research on visuo-haptic augmented reality system for upper limb functional rehabilitation [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2019.
- [20] 刘佳, 郭斌, 张晶晶, 等. 视触觉融合的增强现实三维注册方法 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(11): 70-76.
- LIU J, GUO B, ZHANG J J, et al. 3D registration method for augmented reality based on visual and haptic integration [J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(11): 70-76.
- [21] BARBIERI L, BRUNO F, COSCO F, et al. Effects of device obstruction and tool-hand misalignment on user performance and stiffness perception in visuo-haptic mixed reality [J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2014, 72(12): 846-859.
- [22] FLECK J J, ZOOK Z A, TJANDRA T W, et al. A cutaneous haptic cue characterization testbed [C]. IEEE World Haptics Conference (WHC), 2019: 319-324.
- [23] 吴国新, 左云波, 秦文丽, 等. 工业室内环境中建立增强现实系统模型研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(5): 196-201.
- WU G X, ZUO Y B, QING W L, et al. Research on augmented reality system model in industrial indoor environment [J]. Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(5): 196-201.
- [24] 郑太雄, 黄帅, 李永福, 等. 基于视觉的三维重建关键技术研究综述 [J]. 自动化学报, 2020, 46(4): 631-652.
- ZHENG T X, HUANG SH, LI Y F, et al. Key techniques for vision based 3D reconstruction: A

review [J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46 (4): 631-652.

[25] 刘佳,钱昌宇,谢余磊,等. 基于增强现实的视触觉交互算法[J]. 高技术通讯,2021,31(9):910-924.

LIU J, QIAN CH Y, XIE Y L, et al. Visuo-haptic interaction algorithm based on augmented reality [J]. Chinese High Technology Letters, 2021, 31 (9): 910-924.

作者简介

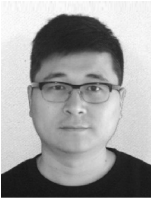


刘佳,2008 年于东南大学获得博士学位,现为南京信息工程大学教授、硕士生导师,主要研究方向为虚拟/增强现实、力触觉再现、人机交互。

E-mail: liujia@nuist.edu.cn

Liu Jia received her Ph. D. degree from Southeast University in 2008. She is currently a professor and a M.Sc. advisor at Nanjing University of Information Science & Technology. Her

main research interests include virtual/augmented reality, haptic display, and human-computer interaction.



陈大鹏(通信作者),2011 年于安徽理工大学获得学士学位,2019 年于东南大学获得博士学位,现为南京信息工程大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为力触觉再现、虚拟/增强现实、人机交互、康复工程。

E-mail: dpchen@nuist.edu.cn

Chen Dapeng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2011, and received his Ph. D. degree from Southeast University in 2019. He is currently an associate professor and a M. Sc. advisor at Nanjing University of Information Science & Technology. His main research interests include haptic display, virtual/augmented reality, human-computer interaction, and rehabilitation engineering.