

一种基于三维建图和虚拟现实的人机交互系统

张辉[†], 王盼, 肖军浩, 卢惠民

(国防科技大学 智能科学学院, 长沙 410073)

摘要: 以提高人机共融水平为目的,以救援机器人为背景,提出并实现基于三维建图和虚拟现实(VR)技术的人机交互系统. 在该系统中,救援机器人基于多线激光雷达和惯性测量单元(IMU)实时构建环境的三维点云地图,并将建图结果增量式地表示为3D-NDT地图,实时传输至操作台的虚拟现实系统中可视化;同时,操作人员利用虚拟现实系统的交互设备生成机器人的控制指令,控制机器人运动,构成一个完整的人在回路的人机交互系统. 该系统在将机器人环境实时在虚拟现实可视化的基础上,可以给操作人员以极强的沉浸感,有利于操作人员更直接地理解机器人所处环境. 此外,该系统作为一种新的人机交互方式,为提高人与机器人的自然交互水平提供了新思路,对促进人机交互技术的发展具有重要意义.

关键词: 人机交互; 救援机器人; 三维建图; 虚拟现实; 3D-NDT地图; 沉浸感

中图分类号: TP24

文献标志码: A

A human-robot interaction system based on 3D mapping and virtual reality

ZHANG Hui[†], WANG Pan, XIAO Jun-hao, LU Hui-min

(College of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to improve the level of the human-robot interaction(HRI), a HRI system based on 3D mapping and virtual reality(VR) is proposed, which is realized for rescue robots. In this system, rescue robots construct the 3D environment point map in the complex post-disaster environment based on a multi-line laser radar and an inertial measurement unit(IMU), which is represented using the 3D-NDT representation method. The map is then incrementally transmitted to the VR system. In the VR side, the human operator uses interactive devices to generate robot control commands to tele-control the robot's movement, in order to perform the rescue task. Using the proposed system, the operator can obtain a strong sense of immersion, and can understand the robot's working environment more directly based on the real-time visualization of the robot environment in virtual reality. In addition, as a new way of human-robot interaction, the proposed system provides new ideas to improve the natural level of interaction between the robot and the human operator, and is of great importance to promote the development of human-robot interaction technology.

Keywords: human-robot interaction; rescue robots; 3D mapping; virtual reality; 3D-NDT map; cense of immersion

0 引言

近年来频发的各种灾害如地震、火灾、洪水、恐怖袭击、武力冲突等,严重威胁着人类公共安全,引起了社会的广泛关注. 虽然人们对各种灾难的警觉和反应能力有所提高,但在处理破坏性灾难事件时还是准备不够充分,很多受困者依然因不专业、不及时的救援而失去生命^[1].

由于救援机器人应对复杂环境时的通过能力强,

可搭载各种有利于救援的传感器和执行器代替人类先一步进入灾区进行探索,建立环境地图,搜索受困人员,确定他们的生命状况和具体位置,并在地图上标记. 这些标记可以用于辅助救援人员有目的、有计划地在救援“黄金时间”内救出更多的受灾人员,挽救更多的生命. 与此同时,救援机器人参与救援还可避免灾后现场复杂环境变化(如建筑物倒塌等)给救援人员的人身安全带来的威胁. 此外,对于毒气、高

收稿日期: 2017-06-23; 修回日期: 2018-01-25.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0803300); 国家自然科学基金项目(61503401, 61773393); 中国博士后科学基金项目(2014M562648).

责任编辑: 方勇纯.

作者简介: 张辉(1971—),男,教授,博士,从事机器人技术及其应用等研究; 王盼(1993—),男,硕士生,从事机器人技术、虚拟现实技术及其应用的研究.

[†]通讯作者. E-mail: zhanghui_nudt@126.com

温、核辐射等恶劣环境,救援人员无法在第一时间进入现场进行救援,救援机器人可代替人类进入现场.如在日本福岛地震后,美国派出了4台机器人,包括iRobot公司的Packbot510和Warrior710,这些机器人可检测温度、伽马辐射、爆炸性气体以及有毒的化学物质,并把所有数据实时回传,这验证了机器人用于实际救援的有效性.

在现有的技术水平下,救援机器人虽然具备了一定的智能,但不足以实施自主救援.主要原因如下:1)机器人决策水平尚不及人类;2)机器人对被困人员等信息的感知能力不及人类.因此,人在回路的遥控仍然是救援机器人系统走向实际应用必不可少的环节^[2].然而,传统的救援机器人遥控主要存在以下3个问题:1)利用液晶显示屏等显示设备为操作员提供机器人环境信息,使操作员在第三视角下的临场感不强;2)救援现场电磁环境复杂,网络带宽有限,传回的视频流经常会有延时和丢包现象,增加操作人员的操作难度,容易使操作员疲劳;3)利用手柄、键盘等设备为机器人下达运动级指令的传统方式控制效率低下.

事实上,上述问题是目前通过遥控方式进行人-机器人协作的共性问题.因此,国内外学者提出了人机共融的目标,即能够与作业环境、人和其他机器人共融的机器人^[3].机器人与人共融,对人机交互水平、效率,尤其是自然化、智能化程度提出了很高的要求.如何有效提高人机交互和协作效率是一个极具挑战性的问题. Birk等^[4]指出,机器人遥控操作按照指令层次可分为任务级、行为级和运动级3个层级.这3个层级中,任务级的遥控操作效率最高,对通讯的依赖性最低,但对机器人自主能力的要求也最高.运动级遥控操作对机器人自主性要求最低,但操作员的负担最重,由于操作员一直处于紧张状态,容易导致疲劳和误操作.在2015年的DARPA Robotics Challenge中,获得冠军的韩国KAIST团队认为其重要的技术秘密之一就是运动级遥控操作与机器人自主之间实现了完美的平衡.

针对目前移动机器人领域广泛使用的运动级遥控,研究人员主要通过改进人机交互界面^[5]的设计来提高遥控操作的效率和机器人系统的性能.文献[6]系统地研究了人机交互界面即机器人遥控站界面的设计对参加AAAI和RoboCup救援机器人比赛性能的影响,提出了若干设计准则,如尽可能使用单个显

示器、避免在界面中使用小视频窗口、避免窗口发生遮挡、界面设计要考虑潜在的使用者而不是开发者等.

随着语音识别、图像理解、肌电信号提取、脑机接口等技术的进步,基于语音^[7]、动作^[8]的人机交互技术逐步走向成熟,基于肌电^[9]、脑电^[10]等的新型人机交互技术开始出现,为人机交互提供了更多的选择.

与上述技术不同,本文提出一种基于三维建图和虚拟现实的人机交互方法,构建机器人与虚拟现实虚实结合的人机交互系统,并以机器人救援为背景,针对救援机器人环境探索任务进行试验研究.结果表明,这种新型的人机交互系统能够为操作人员提供第一视角信息,同时操作人员利用虚拟现实的交互设备为机器人下达控制指令,可高效实现人机协同完成救援机器人环境探索的任务.

本文的主要贡献如下:

1)提出一种基于三维建图和虚拟现实的人机交互框架,并以机器人救援为背景进行了系统实现和实验研究;

2)实现基于虚拟现实系统的人在回路的人机交互.

1 基于三维建图和虚拟现实的人机交互系统

以提高人机共融水平为目标,以救援机器人的人机协同环境探索为研究背景,提出并实现融合实时三维建图技术和虚拟现实(Virtual reality, VR)技术的人机交互系统.

如图1所示,机器人基于三维激光雷达和惯性测量单元(Inertial measurement unit, IMU)的数据,利用基于雷达的低漂移实时定位与建图(Low-drift and real-time lidar odometry and mapping, LOAM)^[11]算法构建复杂灾后救援环境地图,再将建图结果增量式地表示为3D-NDT^[12]地图.通过无线网络通信实时将机器人位姿和增量式地图分两个线程传输至操作台,并在虚拟现实中可视化,操作人员在虚拟现实系统中根据机器人位姿和环境可视化结果利用虚拟现实的交互设备对机器人下达控制指令,从而构成了人在回路的人机协作环境探索系统.本系统可以带给操作员极强的沉浸感,并对网络通信带宽要求较低,同时可利用虚拟现实的交互设备实现人与机器人的交互,实现人类智能与机器智能的有机融合.

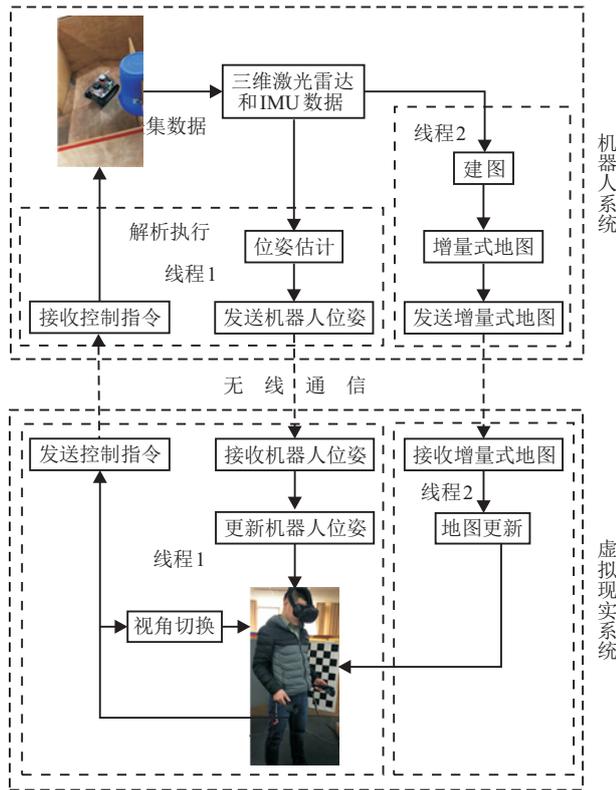


图 1 系统框架

2 基于 LOAM 的实时地图构建和位姿估计

同步定位与建图 (Simultaneous localization and mapping, SLAM)^[13-15] 是移动机器人领域最重要的问题之一,也是机器人领域的热点、难点问题,是致力于解决移动机器人自主构建未知环境地图,并依据构建的环境地图实现机器人自定位^[16]的问题。其中基于激光雷达的 SLAM 算法多以帧间配准为基础,而迭代最邻近方法 (Iterative closest point, ICP) 及其各种变种^[17-20] 是目前应用最广泛的帧间配准技术,其主要思想是通过最邻近原则建立两帧点云数据集合之间的对应关系,通过优化转移矩阵使得对应点距离之和达到最小,经多次迭代后收敛到全局最优。ICP 算法在应用于实际机器人 SLAM 系统时面临两大问题:第一,对初始值有较大依赖性,即当两帧观测数据集存在较大的位姿变换,且未能提供合理的初始转移矩阵时,ICP 算法有可能陷入局部最优解^[21];第二,作为一种迭代寻优算法,ICP 的实时性难以保证。为了解决第一个问题,一般做法是结合其他位姿估计传感器,如光电编码器、IMU 等。对于复杂救援环境而言,由于车体侧滑和晃动等造成光电编码器的精度较低,本文结合 IMU 进行机器人位姿估计。针对第二个问题,Zhang 等^[11] 提出了异频多线程 ICP 算法,即 LOAM 算法,将机器人的运动位姿估计和激光雷达建图分别由两个线程完成,确保了算法的实时性。

本文将基于 LOAM 算法,利用三维激光雷达和

IMU 估计救援机器人位姿,构建机器人救援环境的三维点云地图。

2.1 机器人位姿估计

在建图过程中,由于机器人一直处于运动状态,且激光雷达不是在一个瞬时完成对每一帧点云数据的获取,这导致激光雷达在每个周期内获取点云数据对应的雷达坐标系不一致,本文将将其称为畸变。因此,LOAM 算法首先融合 IMU 数据,获取机器人运动先验信息对存在畸变的每帧点云进行粗配准;然后根据点的曲率大小提取点云中每个扫描面内的角点和平面点作为特征点(曲率计算方法可参见文献^[11]),利用得到的特征点进行迭代配准,有效降低了算法的复杂度。

定义激光雷达在 $k-1$ 和 k 周期内得到的点云集为 P_{k-1} 和 P_k ,粗配准后的点云集为 P_{k-1}^- 和 P_k^- 。定义角点集合 ϵ_k ,平面点集合 χ_k , $X_{(k,i)}^L$ 是在点云 P_k 中提取的角点集合 ϵ_k 或平面点集合 χ_k 中的任意一个点。假设当前时间为 t , t_{k+1} 为周期 k 的结束时间,令 $T_k^L(t_{k+1})$ 为激光雷达在 $[t, t_{k+1}]$ 内的位姿变化,即 $T_k^L(t_{k+1}) = [\tau_k^L(t), \theta_k^L(t)]^T$,其中 $\tau_k^L(t) = [t_x, t_y, t_z]^T$ 和 $\theta_k^L(t) = [\theta_x, \theta_y, \theta_z]^T$ 分别为雷达参考系下 $[t, t_{k+1}]$ 内的位置变化和姿态角变化。

2.2 建图

由 2.1 节输出得到第 k 个建图周期结束时间 t_{k+1} 的位姿变换为 $T_k^L(t_{k+1})$ 。定义在第 $k-1$ 个建图周期结束时构建的地图点云为 Q_{k-1} ,雷达位姿在世界参考系下为 $T_{k-1}^W(t_k)$ 。首先,根据位姿估计在 t_k 到 t_{k+1} 内的输出 $T_k^L(t_{k+1})$,可以依据 $T_{k-1}^W(t_k)$ 得到 $T_k^W(t_{k+1})$,将其作为建图匹配算法中旋转平移矩阵的初值;其次,利用 $T_k^W(t_{k+1})$ 将 P_k^- 通过坐标变换配准到世界参考系下,将其定义为 Q_k^* ;再次,依据配准算法将 Q_k^* 和 Q_{k-1} 进行配准,得到最优的位姿估计 $T_k^W(t_{k+1})$;最后,将点云 Q_k^* 按照 $T_k^W(t_{k+1})$ 向世界参考系作投影,进一步与点云 Q_{k-1} 融合得到新的 Q_k 。在建图算法中,特征点的提取及配准方法与位姿估计算法一致,差别在于建图算法的特征点数量是位姿估计算法的 10 倍。在实际实现中,为了使点在地图中均匀分布并减少内存消耗,本文使用 voxel-grid 滤波器对地图进行降采样。

2.3 机器人硬件平台介绍

本系统中的机器人平台为课题组自主研发的 NuBot 救援机器人,该机器人采用履带式移动机构,配有两条动力主履带。机器人全载(搭载网桥、激光雷达和 IMU)情况下长为 720 mm,宽为 400 mm,高为

440 mm,采用两组24 V锂电池对动力系统和感知系统进行供电.在本文实验过程中,网桥水平放置,IMU位于激光雷达正下方,与激光雷达平行安装,激光雷达和IMU的Z轴与机器人坐标系的Z轴重合,如图2所示.

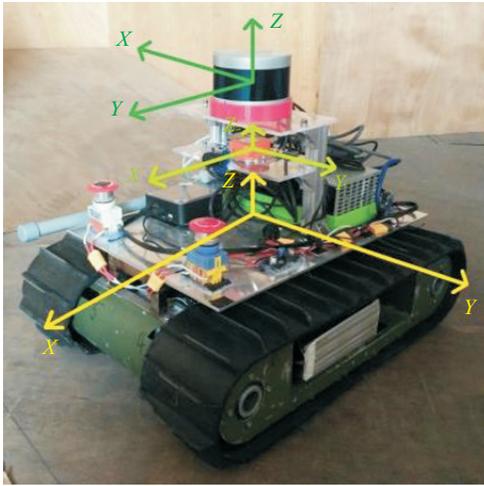


图2 NuBot救援机器人

NuBot救援机器人搭载德国Beckhoff公司生产的工业控制计算机作为处理核心和控制中心.该计算机运行Ubuntu操作系统14.04 LTS版本,机器人软件采用机器人操作系统(Robot operating system,简称ROS)构建.

本系统集成了Velodyne公司生产的16线激光雷达VLP-16,使用的IMU为Xsens公司生产的在机器人领域广泛使用的MTi-100系列惯性测量单元.

2.4 建图结果

本文以RoboCup救援机器人比赛场地和室内走廊(如图3(a)和图3(b)所示)为测试场地,基于三维激光雷达和IMU构建三维环境地图,建图结果如图3(c)和图3(d)所示,其中图3(c)和图3(d)分别为基于救援机器人比赛场地和室内走廊环境的建图结果.从图中可以看出,LOAM算法可以精准地构建出机器人所处环境的三维地图,图中颜色信息表示同一帧点云内的点云高度信息.

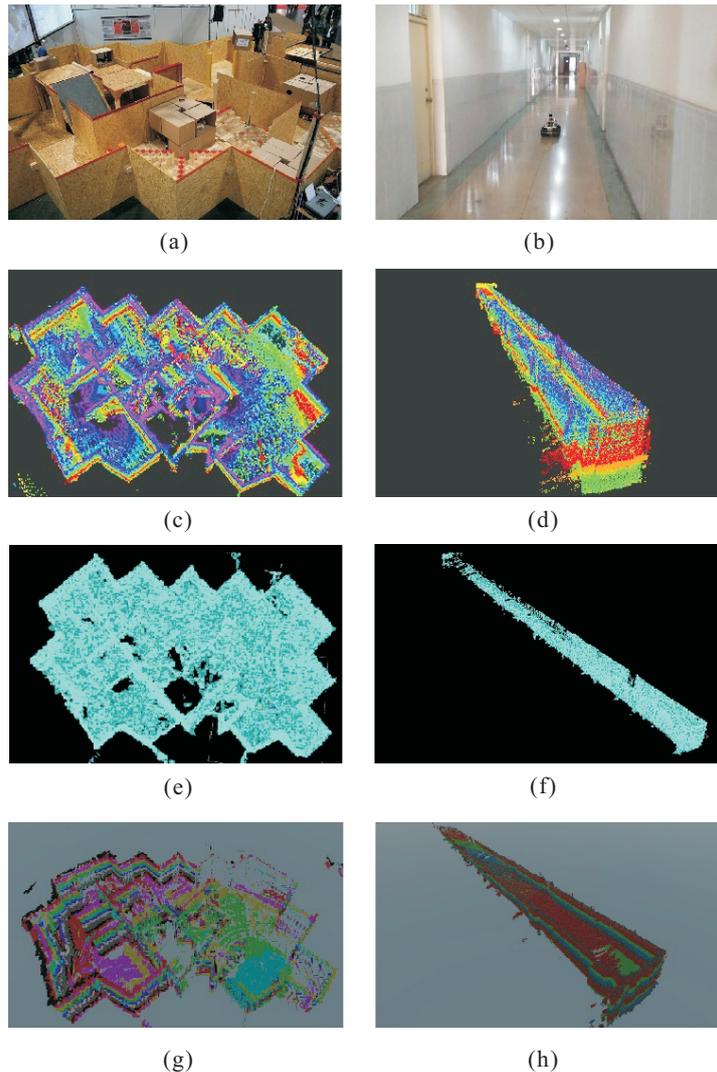


图3 基于救援机器人比赛场地和室内走廊环境的实验结果

3 三维地图在虚拟现实实时可视化

在实时精确构建机器人救援环境地图的基础上, 本文将其在虚拟现实可视化, 给操作人员提供第一视角信息以直接理解机器人所处救援环境, 为进一步实现操作人员与机器人基于虚拟现实进行人机交互提供信息支撑。

3.1 地图表示

在建图过程中, 地图以 1 Hz 的频率输出, 每帧约生成 4 万个点。以本文所使用的救援场地为例, 建立完整的地图约有 50 万个点 (每个建图周期都使用了 voxel-grid 滤波器对点云地图进行降采样, 故点云数不是简单累积的)。基于现有的虚拟现实渲染技术, 在本文所用虚拟现实设备中渲染 50 万个对象是不可能的, 且利用无线网络通信传输所有点云会使得系统对带宽要求太高。因此, 在虚拟现实实时可视化机器人救援环境地图, 必须采用合适的方式压缩地图数据, 同时又不影响地图精度并保留主要信息。

目前, 压缩三维点云地图的主要表示方法有 Octomap^[22-23] 和正态分布变换 (Normal distributions transform, NDT) 地图^[24]。Hornung 等^[22] 基于八叉树和概率估计方法提出 Octomap 框架, 这是一种体素地图实时生成方法, 通过八叉树对地图进行压缩, 当八叉树分割层数越少时数据压缩比越大, 但地图会损失大量细节, 精度较低; 当分割层数较多时, 又会导致压缩比急剧下降。3D-NDT^[25] 算法是由 Magnusson 等在 2D-NDT 基础上提出并加以改进的, 3D-NDT 地图将三维点云空间均匀分割为多个 NDT 单元, 并通过计算每个 NDT 单元内三维点的分布将其拟合为一个有位置和尺度的椭球。该表示方法可以高效地压缩地图数据量, 同时可以保留地图的主要信息。本文针对 RoboCup 救援机器人比赛场地和室内走廊的三维点云地图分别利用 Octomap 和 3D-NDT 地图表示, 结果如表 1 所示。

表 1 三维点云地图与 Octomap、3D-NDT 地图对比结果

测试场地	分辨率 / m ³	栅格数量		压缩比 / %	
		Octomap	3D-NDT	Octomap	3D-NDT
比赛场地	0.001	23 050	17 055	94.80	96.16
	0.008	5 946	4 484	98.66	98.99
室内走廊	0.001	68 215	37 135	89.27	94.16
	0.008	17 267	11 762	97.28	98.15

从表 1 可以看出, 在分辨率相同的情况下, 3D-NDT 地图的压缩比要高于 Octomap, 故本文将实时构建的地图用 3D-NDT 方法在虚拟现实中进行可视化。本文将三维点云地图用 3D-NDT 地图表示的结果

如图 3(e) 和图 3(f) 所示。通过将图 3(e)、图 3(f) 与图 3(c)、图 3(d) 作对比可以发现, 使用 3D-NDT 的地图表示方式既可有效降低地图数据量, 又不影响地图整体轮廓和精度。

3.2 增量式的实时可视化

本文构建的人机交互系统中, HTC Vive 虚拟现实系统在救援人员所在的操作站运行, 但是建图和地图表示算法在 NuBot 救援机器人的车载计算机上运行。因此, 本文通过 UDP 网络通信和 JSON 数据编码方式进行跨平台的数据交互。

在可视化过程中, 由于虚拟现实渲染较慢, 且随着机器人的移动, 地图逐渐增长, 即使用 3D-NDT 地图代替点云地图, 每次将所有 NDT 单元重新传输并可视化也是不科学的。本文提出首先计算点云地图的差分得到增量式点云地图, 然后将增量式点云地图用 3D-NDT 地图表示后实时传输至操作台, 并在虚拟现实系统中实时渲染。

具体算法如下: 将采用 LOAM 算法在第 k 周期得到的地图与系统在第 k 周期之前构建的所有机器人环境地图作对比, 若第 k 周期的某个点与第 k 周期之前构建的所有机器人环境地图中某个点在空间上的欧氏距离小于一定阈值 (本文经过实验设定阈值为 0.02 m), 则认为该点已经在虚拟现实中进行渲染, 不再进行传输和渲染, 由此即可得到增量式点云地图, 然后将得到的增量式点云地图用 3D-NDT 地图表示方式进行表示。

为了提高增量式点云地图的计算效率, 本文采用 KD-Tree 存储点云地图。考虑到 NuBot 救援机器人运行速度较低, 若以 1 Hz 的频率更新, 则新生成的点云会比较稀疏。实验发现, 以 0.2 Hz 的频率, 即每隔 5 s 输出一帧新点云地图, 并拟合成 3D-NDT 地图效果较好。定义在第 $k-5$ 周期末得到的配准至世界坐标系的点云地图为 Q_{k-5} , 在第 $k-4$ 至第 k 周期得到的配准至世界坐标系的点云地图为 Q_k^A , 在第 $k-4$ 至第 k 周期的增量地图为 Q_k^+ 。算法框图如图 4 所示。

对于每个 NDT 单元, 均可以通过一个椭球进行表示, 椭球的中心位置和 x 、 y 、 z 方向上的半径分别代表了每个 NDT 单元的中心位置和 x 、 y 、 z 方向上的半径。

在虚拟现实可视化时, 本文使用 Unity3D 中的预制体 Sphere 代替 NDT 单元, 得到了较好的可视化结果。机器人地图在虚拟现实实时可视化结果如图 3(g) 和图 3(h) 所示, 图 3 中的颜色信息表示环境的高度。

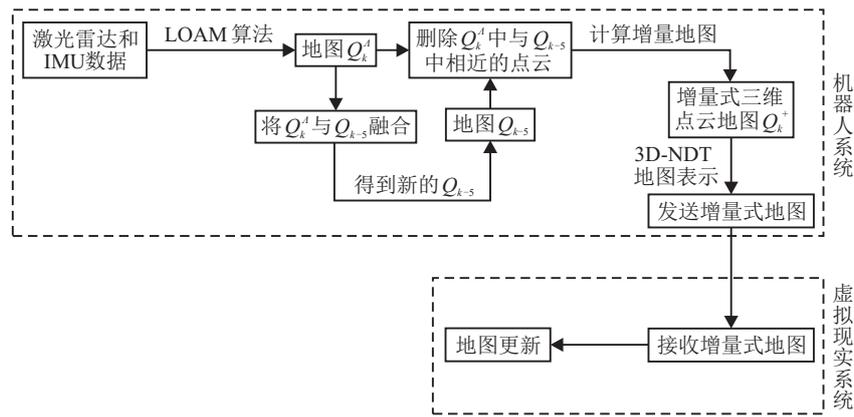


图4 增量式实时可视化算法

3.3 实验结果对比分析

本文通过将第 $k - 4$ 至第 k 周期生成的点云地图 Q_k^A 与第 $k - 5$ 周期末得到的点云地图 Q_{k-5} 作对比,剔除重复点云,得到增量式点云地图 Q_k^+ ,再将 Q_k^+ 用 3D-NDT 地图进行表示,提高地图传输和渲染的实时性,并降低系统对网络带宽的要求.在此,本文对采用 3 种地图(点云地图、用 3D-NDT 地图对点云地图进行表示得到的地图、用 3D-NDT 地图对增量式点云地图进行表示得到的地图)实现机器人地图在虚拟现实实时可视化时的网络通信数据量作比较,以验证文中计算增量式点云地图以及用 3D-NDT 地图进行表示的有效性,比较结果见图 5.

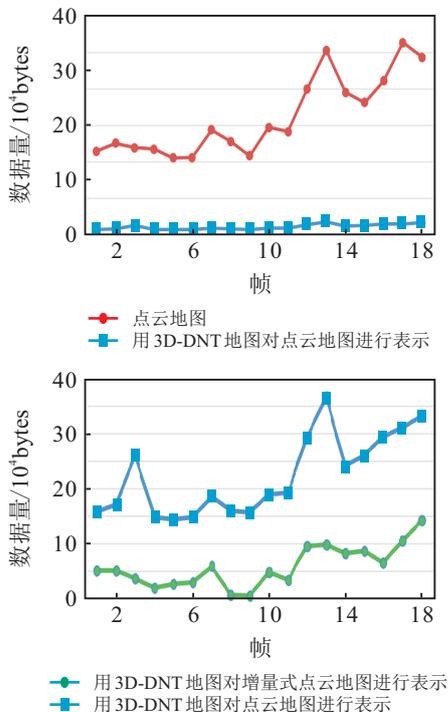


图5 网络通信数据量对比

从图5可以看出,本文通过计算增量式点云地图,并用 3D-NDT 地图进行表示的方法可以高效地压缩网络通信数据量.

结合图5可以得出,本文所提出的机器人地图在虚拟现实中的实时可视化方法不仅可以高效地压缩网络通信时的数据量,还可以进一步降低机器人系统对网络通信带宽的要求.

4 在虚拟现实中与机器人交互

本文在虚拟现实系统中实时可视化机器人环境的基础上,提出利用 Htc Vive 虚拟现实系统提供的交互设备(图6所示)实现视角切换与机器人控制.

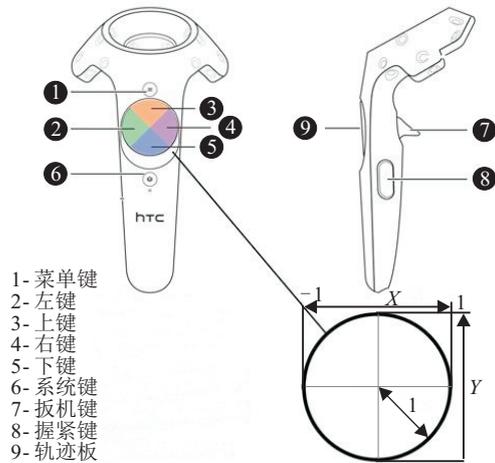


图6 Htc Vive 交互设备

4.1 视角切换

视角切换,即虚拟现实场景中摄像头的移动.在虚拟现实,摄像头可通过两种方式移动:1)操作人员在场景中的移动(如前进、后退、左右平移、左右旋转、点头、抬头等)引起视角切换;2)通过HTC Vive提供的交互设备改变摄像头位置,达到切换视角的目的.视角切换的一个关键性问题是平滑,否则操作人员很容易出现晕眩情况.实践中,因为操作人员的运动基本为连续的,不存在突变情况,所以不会引起晕眩情况,故需着重注意利用Vive控制手柄进行视角切换的平滑问题.本文采用左手柄的3、5、2、4、7、8触

发事件分别为摄像头在空间6个方向设置距当前位置一定距离的目标点,然后将摄像头当前位置与目标点之间的连线分段平滑,并限制摄像头运动速度,有效地实现了视角的平滑切换,即操作者在虚拟现实场景中的平滑运动避免了产生晕眩的情况。

4.2 人机交互

在虚拟现实实现人-机器人交互,必须实时获得机器人的位姿。由于机器人位姿也需要使用网络通信传输至操作台,且实时性要求高,而本文中地图传输时延相对较长,且网络通信所用到的函数为阻塞函数,若使地图传输与机器人位姿传输共享同一线程,则会导致机器人位姿更新严重滞后。因此,本文为机器人位姿传输单独开辟一个线程。

如图1所示,在虚拟现实场景中,操作人员融合机器人位姿和地图信息是实现人机交互的关键一步。在基于三维建图和虚拟现实的人机交互方式中,操作人员沉浸感强,对机器人周围环境的理解更为透彻,因此可以极大地结合人类智能与机器智能。操作人员在正确理解来自机器人反馈的所有信息的基础上,结合任务目标为机器人规划出一条合理的路径或动作序列,然后利用Vive控制手柄的右手柄对机器人速度指令,实现人-机器人在动作级的人机交互。

本文采用右手柄的3、5、2、4触发事件为机器人下达前进、后退、左转、右转的速度指令。因为下达指令和机器人位姿更新在实时性上的要求是一致的,所以本文使下达控制指令和位姿接收共享一个线程,采用JSON数据格式进行编码,通过网络通信传输至机器人端。机器人接收到来自虚拟现实系统发布的控制指令,进行解析并执行。系统实现如图7所示。

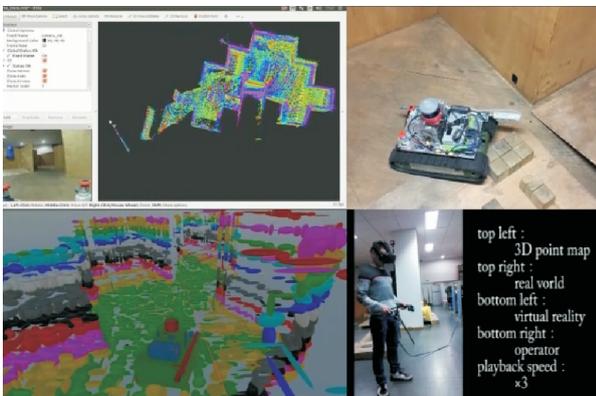


图7 系统实现

本文的实验结果详见作者研究组的网站,链接为<http://nubot.trustie.net/videos>。

5 结论

本文提出了一种新的基于三维建图和虚拟现实技术的人机交互系统。在该系统中,以救援机器人为测试平台,首先利用三维激光雷达和IMU建立环境的三维点云地图,然后在使用3D-NDT方法压缩地图数据量后,通过网络通信将3D-NDT地图增量式地传输至控制台的虚拟现实系统中并可视化,最后基于虚拟现实交互设备,实现对机器人的遥控操作,成功构建了一个真正的人在回路的人机交互系统。该系统可以为操作人员提供极强的沉浸感,使操作人员在操控机器人时不容易疲劳、舒适度好,可有效实现人类智能和机器智能在探索未知环境时的有机融合。

在本系统中,要求机器人具有构建三维环境点云地图和网络通信的能力,因此本系统方案还可广泛应用于各种机器人系统的运动级控制(只要机器人拥有上述两个能力),如飞行器、地面移动机器人、水下机器人等。

此外,本文所提出的人机交互方式使操作人员不仅可以利用虚拟现实系统的交互设备为机器人下达类似于常规手柄下达的速度控制指令,还可以进一步借助于虚拟现实技术的优势,快速获取障碍物的参数(如楼梯的高度、倾斜角、台阶数;斜坡的长度、倾斜角;负障碍的深度、宽度、长度等)、快速获取任务目标的空间位置、快速获取路径参数等,对提高人-机器人的共融水平具有重要的意义。

本文系统依然存在以下缺陷:

1) 可视化结果有待进一步提高,目前利用3D-NDT地图表示机器人环境,会损失颜色信息和部分细节;

2) 人与机器人的交互局限在运动级;

3) 针对不同机器人平台和任务,当面向更高级别的交互时,需要根据具体任务、环境和机器人平台进行交互的学习和训练;

4) LOAM算法无闭环检测环节,当长时间在户外大场景建图时会有较大的累积误差。

下一步的研究方向主要包括:

1) 融入摄像头等传感器,提高机器人环境在虚拟现实中的可视化效果;

2) 利用虚拟现实技术的优势,探索基于虚拟现实的机器人与操作人员在行为级和任务级层面的交互,使人机融合向更高级别发展;

3) 为LOAM算法加入闭环检测,提高其建图精度。

参考文献(References)

- [1] Erkmen I, Erkmen A M, Matsuno F, et al. Snake robots to the rescue[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2002, 9(3): 17-25.
- [2] Kon K, Urano Y, Shiroma N, et al. Development of robot teleoperation system in bad viewing condition[C]. Robotics and Biomimetics. Kunming: IEEE, 2006: 427-432.
- [3] 丁汉. 共融机器人的基础理论和关键技术[J]. 机器人产业, 2016, 6: 12-17.
(Ding H. Basic theory and key technology of human-robot interaction[J]. Robot Industry, 2016, 6: 12-17.)
- [4] Birk A, Schwertfeger S, Pathak K, et al. A networking framework for teleoperation in safety, security, and rescue robotics[J]. IEEE Wireless Communications, 2009, 16(1): 6-13.
- [5] 王楠, 吴成东, 王明辉, 等. 可变形灾难救援机器人控制站系统的设计与实现[J]. 机器人, 2011, 33(1): 202-207.
(Wang N, Wu C D, Wang M H, et al. Design and implementation of the control station system of a shape-shifting search and rescue robot[J]. Robot, 2011, 33(1): 202-207.)
- [6] Yanco H A, Drury J L. Rescuing interfaces: A multi-year study of human-robot interaction at the AAI robot rescue competition[J]. Autonomous Robots, 2007, 22(4): 333-352.
- [7] Lucignano L, Cutugno F, Rossi S, et al. A dialogue system for multimodal human-robot interaction[C]. Proc of the 15th ACM on Int Conf on Multimodal Interaction. Sydney: ACM, 2013: 197-204.
- [8] Chungoo A, Manimaran S S, Ravindran B. Activity recognition for natural human robot interaction[C]. Int Conf on Social Robotics. Switzerland: Springer Int Publishing, 2014: 84-94.
- [9] 彭亮, 侯增广, 王卫群. 康复机器人的同步主动交互控制与实现[J]. 自动化学报, 2015, 41(11): 1837-1846.
(Peng L, Hou Z G, Wang W Q. Synchronous active interaction control and its implementation for a rehabilitation robot[J]. Automation Acta Sinica, 2015, 41(11): 1837-1846.)
- [10] Yu Y, Zhou Z T, Yin E W, et al. Toward brain-actuated car applications: Self-paced control with a motor imagery-based brain-computer interface[J]. Computers in Biology and Medicine, 2016, 77: 148-155.
- [11] Zhang J, Singh S. LOAM: Lidar odometry and mapping in real-time[J]. Robotics: Science and Systems, 2014, 10: 15607.
- [12] Saarinen J, Stoyanov T, Andreasson H, et al. Fast 3D mapping in highly dynamic environments using normal distributions transform occupancy maps[C]. 2013 IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems(IROS). Tokyo: IEEE, 2013: 4694-4701.
- [13] Bailey T, Durrant-Whyte H. Simultaneous localization and mapping(SLAM): Part II[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13(3): 108-117.
- [14] Durrant-Whyte H, Bailey T. Simultaneous localization and mapping: Part I[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13(2): 99-110.
- [15] 王可. 基于混合位姿估计模型的移动机器人三维地图创建方法[J]. 控制与决策, 2015, 30(8): 1504-1508.
(Wang K. Mobile robot 3D map building based on hybrid pose estimation model[J]. Control and Decision, 2015, 30(8): 1504-1508.)
- [16] Riisgaard S, Blas M. A tutorial approach to simultaneous localization and mapping[Z]. Massachusetts Cambridge: Massachusetts Institute of Technology(MIT), 2012.
- [17] Feldmar J, Malandain G, Declerck J, et al. Extension of the ICP algorithm to non-rigid intensity-based registration of 3D volumes[C]. Proc of the Workshop on Mathematical Methods in Biomedical Image Analysis. San Francisco: IEEE, 1996: 84-93.
- [18] Hahnel D, Thrun S, Burgard W. An extension of the ICP algorithm for modeling nonrigid objects with mobile robots[C]. Int Joint Conf on Artificial Intelligence. Acapulco: ACM, 2003: 915-920.
- [19] Magnusson M, Nuchter A, Lorken C, et al. Evaluation of 3D registration reliability and speed-A comparison of ICP and NDT[C]. IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Kobe: IEEE, 2009: 3907-3912.
- [20] Rusinkiewicz S, Levoy M. Efficient variants of the ICP algorithm[C]. The 3rd Int Conf 3-D Digital Imaging and Modeling. Quebec City: IEEE, 2001: 145-152.
- [21] Dong H. Performance improvements for lidar-based visual odometry[D]. Toronto: Aerospace Science and Engineering, University of Toronto, 2013.
- [22] Hornung A, Wurm K M, Bennewitz M, et al. OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees[J]. Autonomous Robots, 2013, 34(3): 189-206.
- [23] Wurm K M, Hornung A, Bennewitz M, et al. OctoMap: A probabilistic, flexible, and compact 3D map representation for robotic systems[C]. Proc of the ICRA 2010 Workshop on Best Practice in 3D Perception and Modeling for Mobile manipulation. Anchorage, 2010.
- [24] Biber P, Strasser W. The normal distributions transform: A new approach to laser scan matching[C]. Proc of 2003 IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas: IEEE, 2003: 2743-2748.
- [25] Magnusson M, Lilienthal A, Duckett T. Scan registration for autonomous mining vehicles using 3D-NDT[J]. J of Field Robotics, 2007, 24(10): 803-827.