doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.03.002

基于临场感增强的果园机器人遥操作可视化系统研究

王运东　周　俊　孙经纬　王　凯　江自真　张　震
（南京农业大学工学院，南京 210031）

摘要：针对果园作业机器人使用单目相机进行遥操作时，仅用二维视频获取环境信息缺乏临场感的问题，设计了一套基于临场感增强的果园环境信息可视化系统，用于果园机器人遥操作。系统由计算服务器、云服务器、网络摄像头、激光雷达、嵌入式开发平台等组成。计算服务器采用 T7920 工作站，并在其上部署 Tensorflow 计算框架和 Open3D 点云算法库，计算服务器在接收到云服务器转发来的环境图像和点云数据后，分别对图像进行导航信息增强，对点云进行曲面重建；嵌入式开发平台可以收集来自于网络摄像头和激光雷达的原始数据，并上传至云服务器；在云服务器部署了以 ZeroMQ 为基础的消息中转程序和 HTML5 后台服务，提供跨互联网的消息通信服务和可移动的遥操作环境信息可视化服务。测试结果表明，部署在计算服务器的导航信息提取模型平均提取导航线时间 86 ms，提取导航线平均精度 16°，均优于对比模型结果。点云重建算法可以有效建立场景轮廓，平均精度 4.9 cm，平均重建时间 24 ms。压缩图像传输及增强处理时延不超过 230 ms，点云的传输时延不超过 400 ms。各项参数可以满足遥操作机器人进行果园作业的基本要求，相比仅有单目相机的遥操作，临场感明显增强，可为果园机器人遥操作提供参考。

关键词：果园机器人；遥操作；临场感；增强现实；三维重建
中图分类号：TP391　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2023)03-0022-10　　**OSID**：

Teleoperation Visualization System of Orchard Robot Based on Enhancing Telepresence

WANG Yundong　ZHOU Jun　SUN Jingwei　WANG Kai　JIANG Zizhen　ZHANG Zhen
(*College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of lack of presence when the orchard robot used a monocular camera for remote operation, only using two-dimensional video to obtain environmental information lacked presence, a set of orchard environment information visualization system based on the enhanced sense of presence was designed. The system consisted of computing server, cloud server, network camera, LiDAR, embedded development platform, etc. The computing server adopted the T7920 workstation, and deployed the Tensorflow computing framework and the Open3D algorithm library of point cloud on it. After receiving the environmental image and point cloud data forwarded by the cloud server, the computing server enhanced the navigation information of the image, and surface reconstructed the point cloud. The embedded development platform could collect raw data from webcam and LiDAR, and uploaded them to cloud servers. A ZeroMQ-based message transfer program and HTML5 background service were deployed on the cloud server, providing cross-Internet message communication services and mobile teleoperation environment information visualization services. The test results showed that the average extraction time of the extraction model for navigation information deployed on the computing server was 86 ms, and the average precision of the navigation line extraction was 16°, which were better than the results of the comparison model. The algorithm of point cloud reconstruction can effectively establish scene contours with an average accuracy of 4.9 cm and an average reconstruction time of 24 ms. The delay of compressed image transmission and enhancement processing did not exceed 230 ms, and the transmission delay of

收稿日期：2022－06－17　修回日期：2022－08－16
基金项目：江苏省重点研发计划项目(BE2017370)
作者简介：王运东(1991—)，男，博士生，主要从事农业机器人研究，E-mail：wangyundong@njau.edu.cn
通信作者：周俊(1974—)，男，教授，博士生导师，主要从事农业装备智能化技术和农业机器人研究，E-mail：zhoujun@njau.edu.cn

point cloud did not exceed 400 ms. The parameters could meet the basic requirements of the remote operation robot for orchard operation. The system significantly enhanced telepresence compared with that only with monocular cameras, which provided an effective reference for the remote operation of the orchard robot.

Key words: orchard robot; teleoperation; telepresence; augmented reality; 3D reconstruction

0　引言

果园生产和大田农业生产一样,要逐渐从机械化、自动化向机器人化发展,研究果园农业机器人具有十分重要的意义[1]。农业机器人作业环境多变,以非结构化环境为主,工作任务具有极大的挑战性[2]。遥操作可以帮助农业机器人在非结构化环境中工作,为农业机器人提供帮助,提高作业效率和质量[3]。然而,机器人遥操作系统通常对未知远程环境的先验知识匮乏,临场感不足,仅通过观看远程环境传回的 2 维视频图像实现控制者对机器人所处环境的理解是非常困难的[4]。

临场感的核心理念在于为操作者提供身临现场的感官辅助,从而提高遥操作机器人完成复杂任务的效率[5]。在实际应用中,临场感技术主要包括视觉感知技术和触觉感知技术两大类[6]。其中,触觉感知技术通常用于机械臂等不可移动机器人[7-9],移动机器人主要通过视觉感知技术提高临场感[10-12]。视觉感知主要通过相机或激光雷达等传感器获取环境信息后,经过视觉增强或三维重建处理,将机器人现场环境在遥操作系统控制端可视化[13-14]。

目前基于视觉增强和三维重建的临场感可视化技术在果园机器人遥操作中的应用刚刚起步,国内外已有学者应用以上技术实现包括农业机器人在内的行业机器人遥操作可视化系统[15]。KUO 等[16]和 XIE 等[17]利用 SLAM 技术结合 RGB 深度相机,对机器人所处的室内未知环境进行三维重建,实现了身临其境的遥操作环境可视化。ZHOU 等[18]使用 RGB 深度相机获取室内点云数据后,结合深度学习技术替换虚拟对象以降低点云大小,开发了一个实时性高的遥操作可视化系统。CHEN 等[19]使用 RGB 深度相机获取树木点云数据后,直接将树木信息实时可视化,在搭配高带宽有线网络的情况下,搭建了适用于遥操作的实时可视化系统。RAMALINGAM 等[20]使用 MobileNet 框架对航空维修机器人所拍摄的飞机表面图像进行破损检测后,对原图像进行增强处理,提升了遥操作航空维修机器人的维修效率。KAMEZAKI 等[21]使用 GPS 和激光雷达获取障碍物距离信息后,生成报警信息,对相机数据进行增强处理后,显示于遥操作端。通过以上研究可以看出,基于三维重建的遥操作可视化系统可以给操作者带来极强的临场感,但这些可视化系统需要传输深度相机采集的稠密点云,单帧数据量巨大,对带宽要求极高[19]。同时,由于图像传感器成本低廉,图像压缩技术成熟,基于单目相机进行图像增强的遥操作可视化技术仍然是稳定且实用性强的选择[22],但是单目相机缺乏距离信息,没有临场感,观察范围通常在 180°以内,遥操作时的环境可视化信息不足[4]。

综上,针对果园环境下使用单目相机的可移动作业机器人遥操作系统视觉信息不足、缺乏临场感的问题,结合果园作业机器人的作业特点和任务需求,本文提出用于果园作业机器人遥操作的环境信息可视化系统,研究融合导航信息进行图像增强的可视化方法和使用雷达点云实时三维重建周围环境的方法,结合两种方法的优势,增强和扩大遥操作系统的可视化信息和范围,从而使操作者获取更多的关键环境信息,增强果园机器人遥操作的临场感。

1　系统整体设计

1.1　果园机器人遥操作系统整体结构

果园遥操作作业机器人的主要功能包括收集果园现场环境信息、携带作业设备到指定地点等。在机器人执行作业任务时,机器人本身的计算能力有限,不能进行过于复杂算法的计算。而果园环境复杂,机器人行走过程中环境变化快,操作人员距离机器人远,操作人员实时获取全面的环境信息难,机器人精细化遥操作困难。因此,在果园机器人自主能力受限的情况下,为保证遥操作机器人能够顺利完成作业,方便操作人员掌握更丰富的果园环境信息,需构建果园作业机器人遥操作环境信息可视化系统。

本文提出的果园遥操作可视化系统属于课题组研发的果园机器人遥操作系统的子系统,遥操作系统整体结构如图 1 所示。遥操作系统主要由遥操作层、云服务层、机器人层和传感器层组成。遥操作层包括 PC 端、移动端和摇杆,现阶段摇杆只能用于 PC 端,PC 端和移动端都可对果园环境信息进行可视化显示,同时,PC 端、移动端以及摇杆均可以产生指令



图 1 遥操作系统整体结构图

Fig. 1 System of teleoperation

数据,用以控制果园机器人。云服务层包括 Web 服务、计算服务和通信服务 3 种服务,Web 服务可以直接为遥操作层的显示界面提供可视化所需的环境信息,计算服务对这些环境信息进行增强加工,通信服务负责建立遥操作层和机器人层的通信信道。机器人层以果园管理机器人为平台基础,可以搭载开沟、除草等机具,可在接收遥操作层的操作指令后,进行相应作业。传感器层包括网络相机、激光雷达、IMU、双目相机等。目前可视化子系统仅使用了网络相机和激光雷达作为可视化环境信息来源。各层之间主要通过 4G/5G 通信和物理直连作为数据链路。

果园作业机器人遥操作可视化子系统安装在南京农业大学工学院研制的电动果园管理机器人上,系统构成如图 2 所示。摄像头和激光雷达都安装在机器人前端上部,用于收集机器人向前行走时的环境信息。摄像头收集范围限制在前端 180°范围;激光雷达可收集周围 360°范围,作为对摄像头数据的补充。嵌入式控制器按照特定频率对摄像头和激光雷达的数据进行实时收集。通过无线路由器,嵌入式控制器将收集到的图形和雷达数据发送至云服务器;云服务器通过 ZeroMQ 框架对采集到的数据进行校验,并发送到计算服务器;计算服务器对数据进行增强处理后,重新发送至云服务器;最后,云服务器通过 WebSocket 框架将增强处理后的雷达和图像数据发送至控制端进行显示。

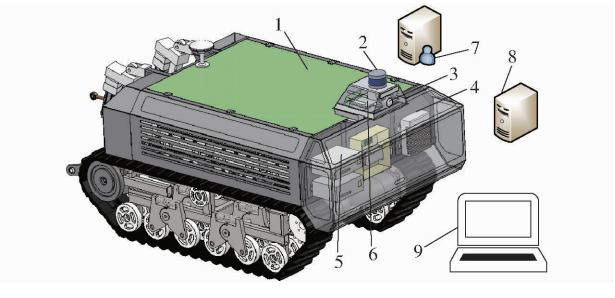


图 2 果园作业机器人遥操作可视化系统构成图

Fig. 2 Composition diagram of remote operation environment information visualization system of orchard robot

1. 履带机器人 2. 激光雷达 3. 网络摄像头 4. 伺服电机 5. 嵌入式控制器 6. 无线路由器 7. 云服务器 8. 计算服务器 9. 控制端

1.2 遥操作可视化子系统硬件参数

(1)嵌入式开发平台

安装于机器人终端的嵌入式控制器采用 Advantech 原装嵌入式工控机 MIC770Q。MIC770Q 采用英特尔 8 核 i7 - 9700E 作为处理器,运行主频 2.6 GHz,内置英特尔超核心显卡 630;配备 2 * 16 GB DDR4 内存条。

(2)网络摄像头

网络摄像头采用萤石云 C3W,最高帧率可达 25 f/s,支持 1 920 像素 × 1 080 像素分辨率的图像;支持 H264 流媒体格式。

(3)激光雷达

激光雷达采用深圳市速腾聚创科技有限公司 16 线激光雷达 RS - LiDAR - 16。RS - LiDAR - 16 采用混合固态激光雷达方式,集合了 16 个激光收发组件,测量距离高达 150 m,测量精度 ±2 cm 以内。

(4)云服务器

云服务器采用阿里云提供的远程虚拟主机,具有公网 IP,用以解决遥操作系统跨区域通信的问题。云服务器采用双核虚拟 CPU,8 GB 虚拟内存。

(5)计算服务器

计算服务器采用戴尔 T7920 塔式工作站,搭载英特尔至强 8 核处理器,内存 128 GB,使用 2 块英伟达 2080Ti 显卡。

1.3 遥操作可视化子系统软件设计

遥操作信息显示软件系统以 Linux 系统、ROS 机器人系统、Tensorflow 深度学习框架和 HTML5 框

架为基础。云服务器 Linux 系统的开发包括 Zeromq 消息队列部署和基于 Python 的 HTML5 后台开发与部署。机器人 Linux 系统的开发包括图像采集发送应用程序、ROS 下激光雷达监听发送程序。计算服务器部署 Tensorflow 深度学习框架和 Open3D 框架，可以对图像进行增强，对点云进行三维重建。使用 HTML5 框架显示增强后的环境信息图像和点云重建数据。

软件整体工作流程如图 3 所示，整体系统运行需要启动 4 个程序。程序 1 部署于机器人端，程序 2 部署于远程云平台，程序 3 部署于计算服务器，程序 4 为 HTML5 前端显示程序。系统启动时，程序 1 抛出两个线程，一个线程负责读取网络摄像头的图形数据，压缩为 JPEG 格式图像后，发送至云端服务器，另外一个线程是一个 ROS 结点，负责订阅程序激光雷达数据，每 400 ms 发送一次点云数据到云服务器。程序 3 部署了 Tensorlfow 框架、一个训练好的导航信息提取模型和点云重建程序，分别进行图像增强和点云三维重建。程序 4 实际是部署于云端服务器的 HTML5 应用程序，可在各种移动应用终端打开显示界面，用来显示图像增强数据和三维重建数据。

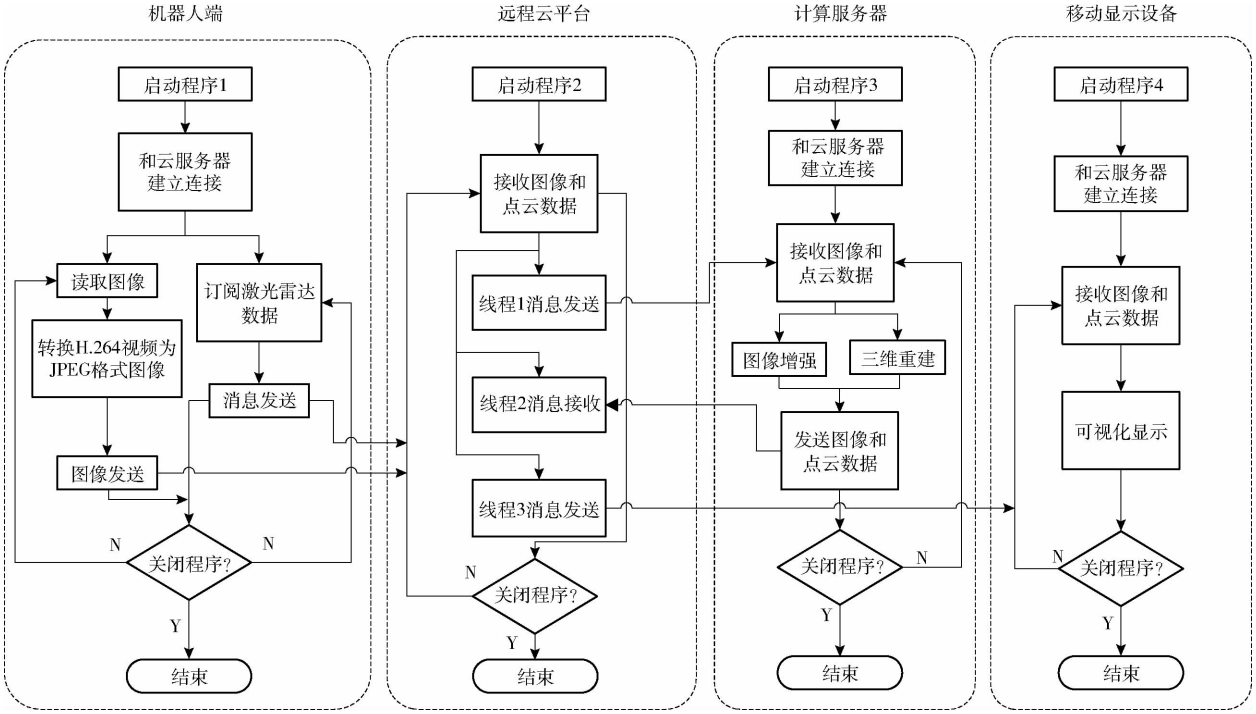


图 3　遥操作环境信息可视化系统流程图

Fig. 3　Flow chart of teleoperation environment information visualization system

2　果园遥操作可视化系统功能模块和方法设计

2.1　临场感可视化界面设计

临场感可视化展示功能包括接收数据和有临场感的展示数据。利用 HTML5 框架提供的 Vue 和 Element UI 组件库开发应用程序的整体界面。如图 4 所示，遥操作显示界面主要分成 3 块：最左侧添加一个 Img 控件用来实时显示原始图像帧，为查看机器人周围环境，Img 控件下面添加第 2 个 Img 控件，实时显示使用激光雷达重建的环境信息，用以协助观察周围摄像头看不到的环境情况，增加临场感；中部再放置一个 Img 控件用来实时显示含有导航信息的临场感增强图像。导航信息主要由道路分割显示信息和导航箭头组成。增强图像上部显示当前机器人的电池电量、电压和行走速度信息；最右侧是操作模块，主要功能包括机器人的运动控制、悬挂控制、所有电机的开关控制以及紧急停止按钮。



图 4　临场感可视化界面

Fig. 4　Telepresence visual interface

2.2　果园图像采集和数据传输

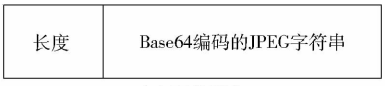
RTSP(Real-time streaming protocol)是一种跨平台的流媒体传输控制协议，内部封装 RTP(Real-time transport protocol)和 RTCP(Real-time transport control protocol)进行媒体传输[23]。C3W 相机采用

H.264 格式对视频数据进行编码,使用 RTP 协议和 RTSP 协议进行网络传输。应用程序使用 OpenCV 框架按照 RTSP 协议设置读取地址进行读取,即可得到视频帧数据。

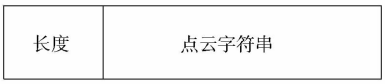
由于程序读取到的视频帧是 BGR 格式,占用空间较大,为提高图像数据传输速度,可以在传输到云服务器前将图像帧进行压缩。本文采用压缩算法复杂度小的 JPEG 压缩方式,使用 OpenCV 开源库即可对图像进行 JPEG 格式的压缩。

需要传输的数据包括图像和点云数据,二者都使用 TCP/IP 协议建立的连接通道进行传输。但二者单次传输数据量都大,在机器人以及其它终端和云服务器进行通信时,易发生丢包、网络不稳定的现象。本文使用 ZeroMQ 框架搭建云通信服务器的中转程序,并分别针对图像和点云数据设计两种通信协议报文。

图 5a 为图像数据报文格式,由数据长度和 Base64 编码的 JPEG 格式图像字符串组成。图 5b 为激光雷达数据的报文格式,由数据长度、点云字符串组成。基于 ZeroMQ 的通信程序包括客户端(Client)和服务端(Server),Server 部署于云服务器,Client 部署于终端程序。Server 不停歇运行,不断监听来自 Client 的消息,监听到消息则进行连接。由于 Client 需要接收到 Server 端回复的信号才能发送下一帧数据,所以基于 ZeroMQ 的通信程序不需要考虑图像和点云数据的顺序问题。图 6 为数据传输程序流程图。



(a) 图像报文



(b) 激光雷达数据报文

图 5 通信协议报文格式

Fig. 5 Communication protocol message format

2.3 基于三维点云快速重建的临场感增强

国内外学者对植物的三维重建做了大量相关工作[24-29],但通常三维重建算法循环较多,复杂度高,所提出的方法仅适用于形态结构简单,且点云分布相对规律的单个植株重建场景[27]。而果园环境复杂,不规则,已有方法耗时过长,不适用于实时性要求高的遥操作场景。因此,针对遥操作高实时性的重建要求,本文提出一种基于 α-shape[28] 的三维重建方法。

在收集通过激光雷达采集到的点云数据后,可以使用 Delauney 三角剖分算法[29] 对点云进行三角

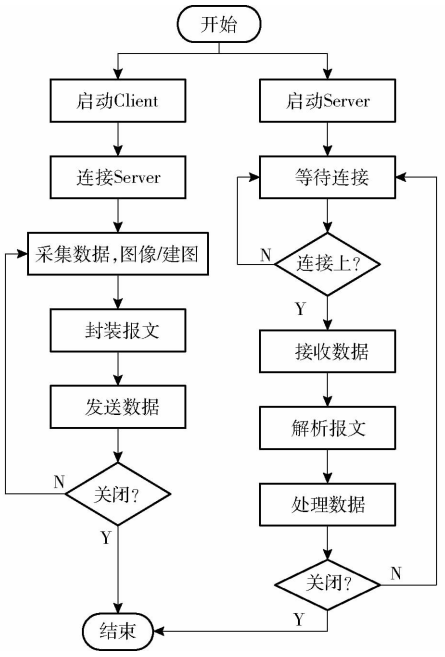


图 6 基于 ZeroMQ 的数据传输程序流程图

Fig. 6 Flowchart of data transmission program based on ZeroMQ

连接,形成四面体组成的三角剖面。每个四面体存在不含其他点云的外接圆球。对所有点云进行三角化后,使用 α 球对三角剖面进行边界判断。一个四面体的外接圆球方程使用行列式表示为

$$\begin{vmatrix} x^2+y^2+z^2 & x & y & z & 1 \\ x_1^2+y_1^2+z_1^2 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2^2+y_2^2+z_2^2 & x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3^2+y_3^2+z_3^2 & x_3 & y_3 & z_3 & 1 \\ x_4^2+y_4^2+z_4^2 & x_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix} = 0 \tag{1}$$

其中 (x_i, y_i, z_i) $(i=1,2,3,4)$ 为四面体顶点坐标。行列式整体可以简写为

$$a(x^2+y^2+z^2) - (D_x x + D_y y + D_z z) + c = 0 \tag{2}$$

其中 a、c、D_x、D_y、D_z 分别表示相应行列式。再根据球体标准方程,半径表示为

$$r = \frac{\sqrt{D_x^2 + D_y^2 + D_z^2 - 4ac}}{2|a|} \tag{3}$$

最终保留此四面体的判断条件是

$$r \leqslant \alpha \tag{4}$$

其中 α 为自定义半径。不断循环此判断,直到形成最终曲面,整体过程如图 7 所示。根据 α-shape 算法的定义,如果对所有点云执行此判断操作,则需要 $O(n^3)$ 的时间开销。先进行 Delauney 三角剖分,只对当前边界部分进行 α-shape 边界判断,则 α-shape 算法本身的开销降低为 $O(1)$ 的时间开销,而 Delauney 三角剖分的算法复杂度[30] 为 $O(n\lg n)$,所以算法整体的时间复杂度为 $O(n\lg n)$,时间开销大

大降低。

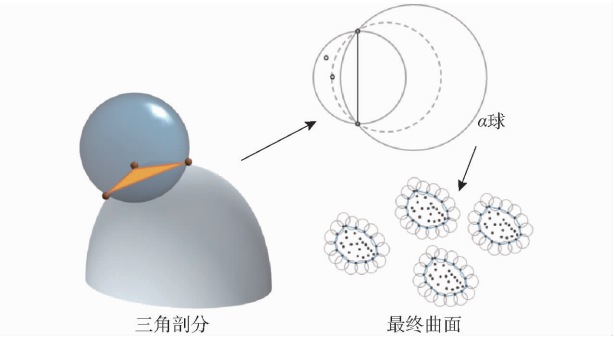


图 7　α-shape 算法示意图

Fig. 7　Schematic of α-shape algorithm

为了让操作人员进一步感知距离信息，参照雷达坐标系，以坐标系原点为圆心，绘制红、绿、蓝 3 个圆作为距离警示线。探测半径从里到外依次为 1.76、2.20、2.64 m。距离警示线和机器人模型结合后如图 8 所示。

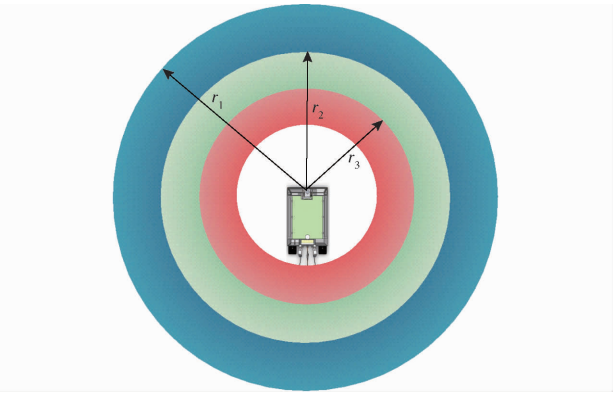


图 8　机器人模型与距离警示线结合效果

Fig. 8　Combined effect of robot model and distance warning line

随后，为进一步增强临场感，将带有距离警示线的机器人模型和点云三维重建的环境场景融合。根据雷达正前方为雷达坐标系 x 轴方向的安装策略，可以给出当前移动机器人的红色引导线，便于操作人员理解现场环境与机器人的关系。效果如图 9 所示。

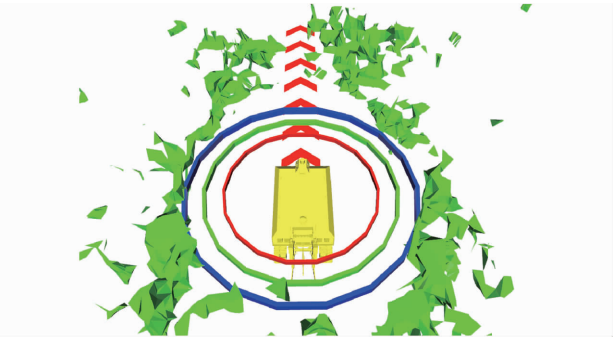


图 9　基于点云三维重建的临场感增强效果

Fig. 9　Telepresence enhancement based on point cloud 3D reconstruction

2.4　基于导航信息融入的临场感增强

Mask R－CNN 的优点主要是：精度高、泛化性能好，被广泛应用于各种场景。但是原始 Mask R－CNN 模型使用的 ResNet－50/101 骨干网络参数多、检测时间久，本文采用参数更少的 MobileNet 作为 Mask R－CNN 主干网络以提高检测速度。MobileNet 模型是一种深度可分离卷积。图 10 所示 MobileNet 将标准卷积分解为深度卷积和 1×1 的逐点卷积。深度卷积将单个过滤器应用于每个输入通道，逐点卷积将深度卷积的结果结合一个 1×1 卷积后输出。标准卷积会在一个步骤中包含过滤和组合操作，而深度可分离卷积则将一步操作分为了两个单独的层：过滤层和组合层。这种分解具有显著减少计算量和模型大小的效果。

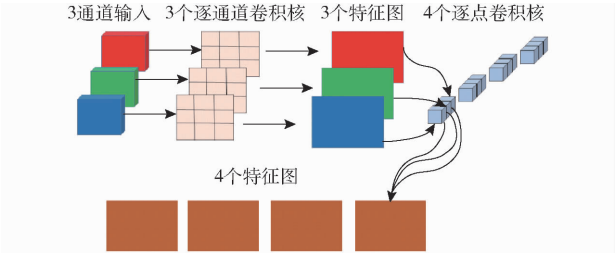


图 10　逐通道卷积和逐点卷积的联合过程示意图

Fig. 10　Schematic of joint process of channel-wise convolution and point-wise convolution

为了提高二维图像的临场感，本文使用改进的 Mask R－CNN 模型建立道路分割模型，根据道路分割模型提取拟合点，拟合导航直线，并通过透视变换将导航路径信息融于环境图像。如图 11 所示，首先由图 11a 通过道路分割模型获取道路分割模块，由图 11b 以最边缘的 4 个拟合点确定目标区域的范围，由图 11c 将目标区域进行透视变换后转换到摄像机平面，图 11d 将导航图形融合于转换后的平面，在图 11e，图 11f 再将融合后的图像经过透视变换后恢复到原来的图像中去。

3　遥操作可视化系统实测与结果分析

3.1　遥操作可视化系统测试方案

首先通过遥操作平台采集图像用于改进的 Mask R－CNN 模型训练，并将训练好的最优模型部署于计算服务器。其次对基于点云的三维重建进行测试，使用 Open3D 实现本文算法。然后，使用抓包工具 Chrome Network 进行图像和点云的传输时间测试，以测试整体系统的实时性。最后，进行果园遥操作试验，以验证可视化系统各项参数的实际有效性。

3.2　导航信息提取测试

共采集图像 1 400 幅，其中 1 000 幅用于模型训

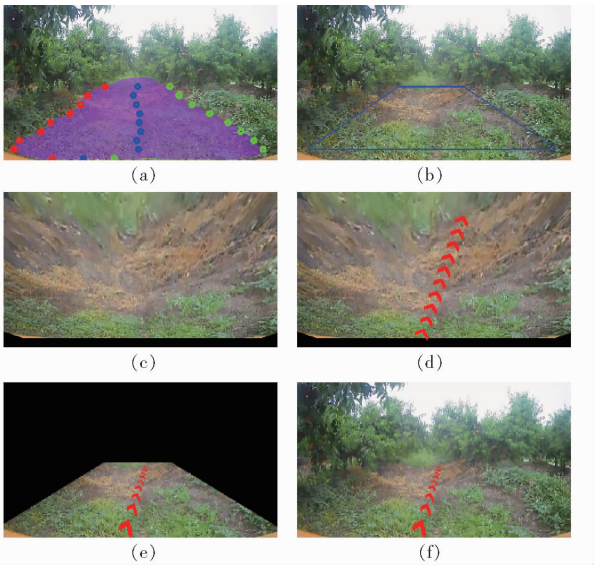


图 11 自适应导航信息融合过程

Fig. 11 Adaptive navigation information fusion process

练,200 幅用于模型验证,200 幅用于模型测试。使用 LabelMe 进行人工手动标注,标注数据集包括光照不足情况、遮挡情况和正常情况等条件的图像。损失值如图 12,选取训练 21 轮得到的模型为最优模型。

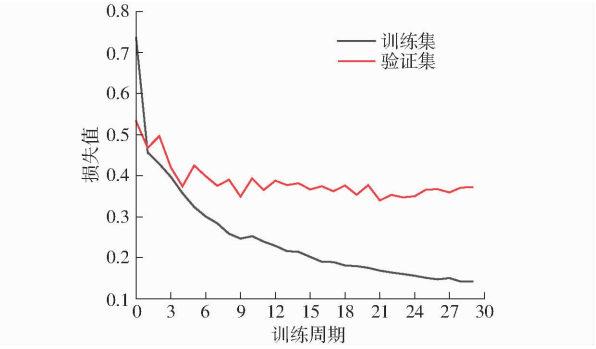


图 12 损失值变化曲线

Fig. 12 Loss value change curves

训练完成后,将 MobileNet - Mask、ResNet50 - Mask 和 ResNet101 - Mask 3 种模型分别部署于计算服务器,在正常场景、遮挡场景和光照不足场景下进行实验,测试图像分辨率 576 像素 ×324 像素。如图 13 所示,以 LabelMe 标注的人工导航直线作为标准导航线,将模型生成的导航线(左侧图虚线,带白色箭头线)和标准导航线做对比(右侧图实线,带黑色箭头线),得到导航线和标准导航线的夹角数值后,分别取 3 种场景夹角平均值为各方法平均精度。测试结果如表 1 所示。

如图 14 所示,左侧图和右侧图分别是原图与导航信息融合结果。可以看出,导航箭头均能够按照导航线位置融合于图像,且实现了导航箭头近大远小的效果,有较强的临场感。

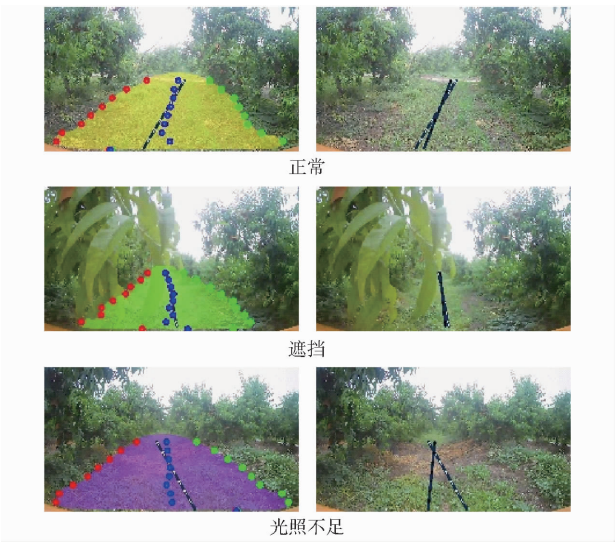


图 13 导航线提取精度实验

Fig. 13 Navigation line extraction accuracy experiment

表 1 各模型检测精度、检测时间对比

Tab. 1 Comparison of detection accuracy and detection time of each model

模型	平均精度/(°)	平均检测时间/ms
MobileNet - Mask	16	86
ResNet50 - Mask	33	151
ResNet101 - Mask	17	320

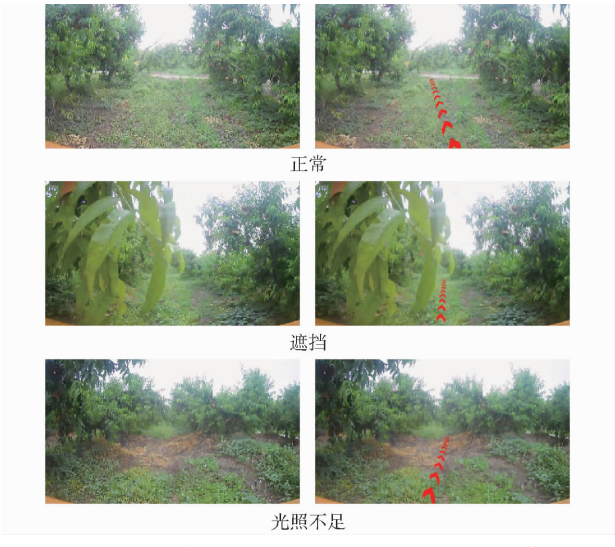


图 14 在正常、遮挡和光照不足场景下的导航信息融合实验结果

Fig. 14 Experiment results of navigation information fusion under three conditions of normal, occlusion and insufficient illumination

3.3 点云三维重建测试

处于果园不同位置的果树冠层和果树稠密程度不同。随机选取 3 处机器人在果园中作业的场景点云数据,利用 Open3D 库在计算服务器上实现本文算法,对点云三维重建算法的有效性和运行速度进行验证和分析。

图 15 为机器人在果园不同位置的场景重建效果图，图中 RGB 图像是机器人前置摄像头拍摄的果园场景图像，原始点云采集自激光雷达，分别展示了和摄像头视野对应的局部原始点云和全局原始点云，以及局部和全局的重建结果。使用黑线标识出人工观察出的局部点云和全局点云的果树障碍物点云区域。从图中可见，本文提出的方法可以重建果园不同位置的场景。场景 1 是果园内的大路，可以看出，原始点云非常凌乱，很难判断出障碍物的轮廓，而重建结果有效地建立了两边障碍物的轮廓。场景 2 和场景 3 都是果园内部垄间小路，原始点云更加难以分辨出机器人应该行走的道路，重建后的结果有效重建出了道路两侧的果树障碍物轮廓。

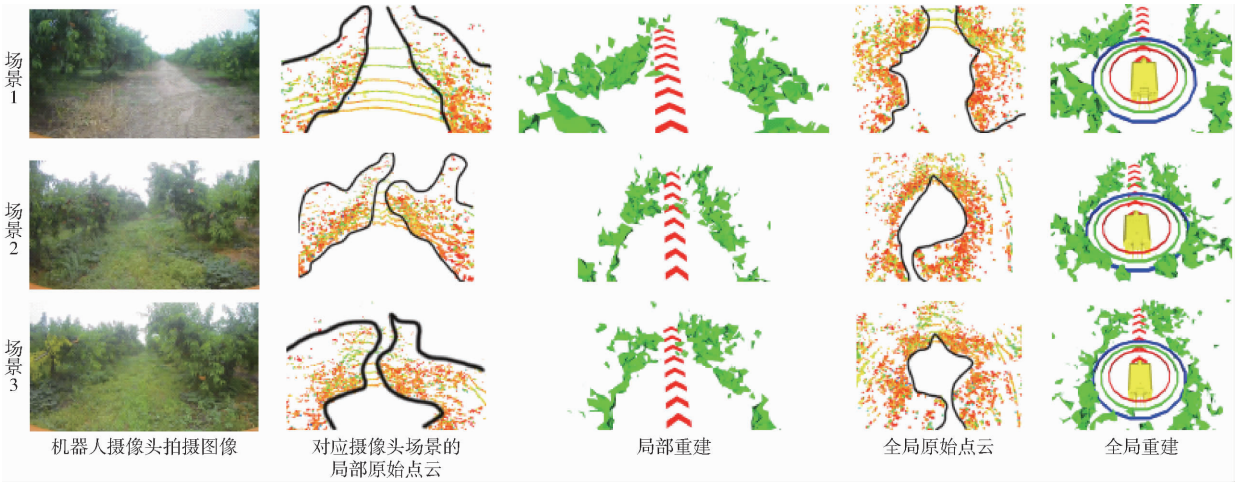
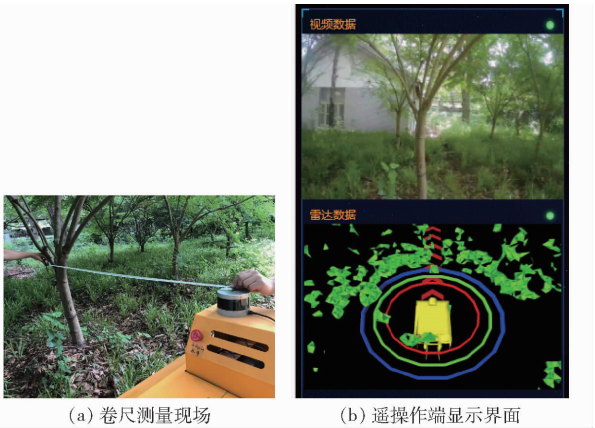


图 15　实际场景与重建结果对比

Fig. 15　Comparison of actual scene and reconstruction results

为了确定场景重建的精度，通过遥操作机器人，寻找和机器人正前方的距离警示线重合的单个植株，并使用卷尺测量重合植株的有效障碍部位，到坐标原点的实际距离，将实际距离与距离警示线的距离差值作为重建精度。实验场景如图 16 所示。随机寻找 3 棵植株进行 3 次测量。精度测量结果为植株 1：6.3 cm、植株 2：－5.2 cm、植株 3：3.8 cm，平均值 4.9 cm。



(a) 卷尺测量现场　　(b) 遥操作端显示界面

图 16　场景重建精度测量

Fig. 16　Scene reconstruction accuracy measurement

将三维重建领域常用的泊松重建算法作为对比算法，分别在 3 个场景上进行重建时间试验。重建时间如表 2 所示。

3.4　遥操作环境信息传输时间测试

原始图像尺寸为 1 920 像素 ×1 080 像素，另调整图像为 576 像素 ×324 像素和 1 152 像素 ×650 像素进行测试。使用机器人端发送点云数据前的编码数据进行测试，分别进行 4 倍下采样、8 倍下采样以及原始点云进行测试。测试结果如表 3 和表 4 所示。

表 2　点云重建时间

Tab. 2　Point cloud reconstruction time

场景编号	点云数量	重建时间/ms	
		泊松重建	本文算法
1	1 673	499.0	32.0
2	1 120	488.1	21.0
3	1 205	478.8	19.0
平均值	1 333	488.6	24.0

表 3　图像传输时间

Tab. 3　Image transmission time

图像分辨率/（像素 × 像素）	图像存储容量/KB	平均传输时间/ms
1 920 × 1 080	73.6	523
1 152 × 650	33.2	350
576 × 324	12.0	230

表 4　点云传输时间

Tab. 4　Point cloud transmission time

平均数量	平均字符串长度	平均传输时间/s
18 736	2 433 480	2.8
4 684	608 070	1.1
2 342	304 185	0.4

3.5 果园遥操作实验

为验证果园作业机器人遥操作可视化系统各项参数在实际作业任务中的有效性,在果园中选取一段约 46 m 的果园内部道路,使用可视化系统进行 3 组遥操作行走实验,实验场景如图 17 所示。设置机器人移动速度为 5 km/h,使用 GNSS 里程计记录机器人行走轨迹。



图 17 遥操作实验场景

Fig. 17 Teleoperation test scenario

实验 1 轨迹曲线如图 18 所示。以 GNSS 里程计记录的原点与终点之间的直线为理想轨迹,可得误差曲线如图 19 所示。3 组实验的最大误差、平均误差和均方根误差如表 5 所示。

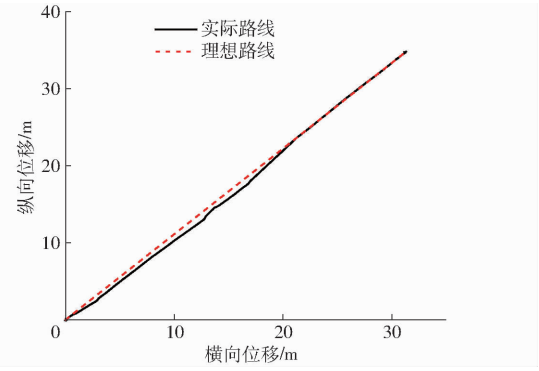


图 18 实验 1 轨迹曲线

Fig. 18 Trajectory curves of experiment 1

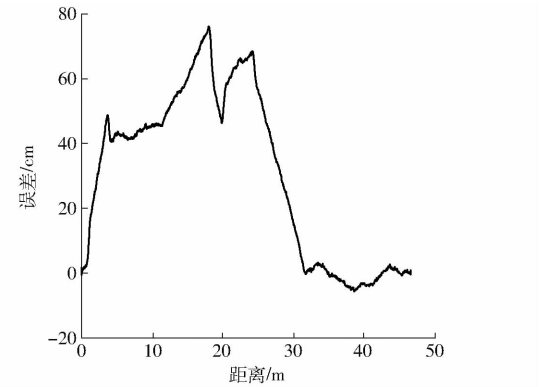


图 19 实验 1 误差曲线

Fig. 19 Error curve of experiment 1

3.6 测试结果分析

(1)基于改进 Mask R-CNN 的分割模型占用空间 95.56 MB,部署于计算服务器后,使用 576 像素×324 像素的环境图像对模型进行测试,平均提取导航线时间 86 ms,提取导航线平均精度 16°。因经过改进主干网络的模型参数量大大降低,所以检测速度相比原始模型提升明显,且在本测试数据集条件下,检测精度也优于对比模型结果。在各个场景下,应用增强算法后的 2 维图像临场感较强,且算法具有稳定性、精确性和实时性优势。

表 5 误差分析

Tab. 5 Error analysis m

类别	最大误差	平均误差	均方根误差
实验 1	0.76	0.19	0.31
实验 2	-0.26	0.06	0.14
实验 3	1.63	0.76	0.92
平均值	0.71	0.34	0.46

(2)本文算法可以有效建立场景轮廓,避免了直接显示凌乱的原始点云。3 次平均重建时间 24 ms,平均精度 4.9 cm。因 α-shape 算法的引入,三维重建算法具备了快速边界判断的能力,算法实时性高,优于泊松重建算法。重建结果融入带有辅助方向箭头和距离辅助线的机器人后,临场感强。

(3)图像和点云所组成的环境信息传输结果表明,将图像尺寸设置为 1 152 像素×650 像素和 576 像素×324 像素,可以满足图像 230 ms 一次的传输要求,将点云控制在 2 342 个以下可以满足 400 ms 一次传输的需求。

(4)果园遥操作实验表明,使用本文提出的果园作业机器人遥操作可视化系统可以对机器人在作业果园进行遥操作,可视化系统各项参数满足遥操作需求。3 组实验的最大误差平均值 0.71 m,平均误差平均值 0.34 m,均方根误差平均值 0.46 m。

4 结论

(1)设计了以云平台、计算服务器、移动可视化端和机器人端为通讯端点的点云及图像远程传输系统。测试结果表明,系统可以传输两种尺寸的图像:1 152 像素×650 像素和 576 像素×324 像素,传输速率都可以满足果园遥操作可视化系统的实时性传输要求。

(2)设计了基于导航信息融入的图像临场感增强算法,该算法对 Mask R-CNN 模型进行了轻量化改造,实现了对导航信息的提取、图像导航信息融合以及导航箭头的透视变换融合。测试结果表明,算法执行时间、稳定性和精度均优于对比模型结果,提高了果园遥操作可视化系统的临场感。

(3)设计了基于稀疏点云的快速三维重建算法,对杂乱的稀疏点云进行了曲面重建,同时,在三维场景中对机器人本体进行等比例虚拟化、构建辅助方向箭头和距离辅助线。测试结果表明,本文提

出的三维重建算法可有效重建出场景轮廓，重建时间优于常用的泊松重建，满足遥操作可视化系统的实时性要求，可进一步提高果园遥操作可视化系统的临场感。

参 考 文 献

[1] 刘成良，贡亮，苑进，等. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报，2022，53(7)：1－22，55.
LIU Chengliang，GONG Liang，YUAN Jin，et al. Current status and development trends of agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(7)：1－22，55.（in Chinese）

[2] 王儒敬，孙丙宇. 农业机器人的发展现状及展望[J]. 中国科学院院刊，2015，30(6)：803－809.
WANG Rujing，SUN Bingyu. Development status and expectation of agricultural robot[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences，2015，30(6)：803－809.（in Chinese）

[3] AMAYA A，ARACHCHIGE D D K，GREY J，et al. Evaluation of human-robot teleoperation interfaces for soft robotic manipulators[C]// Proceedings of the 2021 30th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication (RO－MAN)，2021.

[4] 赵新灿，展鹏磊，吴飞，等. 基于领域知识的 3 维动态场景目标识别和配准[J]. 机器人，2018，40(4)：534－539.
ZHAO Xincan，ZHAN Penglei，WU Fei，et al. Target recognition and registration in 3D dynamic scene based on domain knowledge[J]. Robot，2018，40(4)：534－539.（in Chinese）

[5] 陈英龙，宋甫俊，张军豪，等. 基于临场感的遥操作机器人共享控制研究综述[J]. 浙江大学学报(工学版)，2021，55(5)：831－842.
CHEN Yinglong，SONG Fujun，ZHANG Junhao，et al. Telerobotic shared control strategy based on telepresence：a review[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science)，2021，55(5)：831－842.（in Chinese）

[6] 李卫华，郭军龙，丁亮，等. 月球车地面遥操作技术发展现状与未来展望[J]. 航空学报，2023，44(1)：163－182.
LI Weihua，GUO Junlong，DING Liang，et al. Review and prospect of ground teleoperation technology for lunar rover[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2023，44(1)：163－182.（in Chinese）

[7] 朱晓俊，王学谦，马云萱，等. 绳驱超冗余空间柔性机械臂遥操作系统设计与实验研究[J]. 机器人，2022，44(1)：9－18.
ZHU Xiaojun，WANG Xueqian，MA Yunxuan，et al. Design and experimental study on the teleoperation system for cable-driven and hyper-redundant space flexible manipulator[J]. Robot，2022，44(1)：9－18.（in Chinese）

[8] 薛智慧，刘金国. 空间机械臂操控技术研究综述[J]. 机器人，2022，44(1)：107－128.
XUE Zhihui，LIU Jinguo. Review of space manipulator control technologies[J]. Robot，2022，44(1)：107－128.（in Chinese）

[9] 杨晛，陈传志，华长春. 力反馈水下遥操作系统稳定性分析[J/OL]. 控制理论与应用：1－10.[2022－06－17]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20211231.1326.044.html.
YANG Xian，CHEN Chuanzhi，HUA Changchun. Stability analysis of teleoperated underwater manipulator system with contact force feedback[J/OL]. Control Theory & Applications：1－10.[2022－06－17]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20211231.1326.044.html.（in Chinese）

[10] 秦留界，宋光明，毛巨正，等. 基于手眼双模态人机接口的移动机器人编队共享控制[J]. 机器人，2022，44(3)：343－351，360.
QIN Liujie，SONG Guangming，MAO Juzheng，et al. Shared control of multi-robot formations based on the eye-hand dual-modal human-robot interface[J]. Robot，2022，44(3)：343－351，360.（in Chinese）

[11] 刘传凯，李剑，张天柱，等. 嫦娥五号月面采样遥操作中的关键技术[J]. 中国科学：技术科学，2022，52(3)：473－488.
LIU Chuankai，LI Jian，ZHANG Tianzhu，et al. Key technologies in the teleoperation of the Chang'e－5 lunar sampling[J]. Scientia SinicaI Technologica，2022，52(3)：473－488.（in Chinese）

[12] 倪得晶，宋爱国，李会军. 基于虚拟现实的机器人遥操作关键技术研究[J]. 仪器仪表学报，2017，38(10)：2351－2363.
NI Dejing，SONG Aiguo，LI Huijun. Survey on robot teleoperation based on virtual reality[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2017，38(10)：2351－2363.（in Chinese）

[13] 喻俊志，孔诗涵，孟岩. 水下视觉环境感知方法与技术[J]. 机器人，2022，44(2)：224－235.
YU Junzhi，KONG Shihan，MENG Yan. Methods and technologies for visual perception of underwater environment[J]. Robot，2022，44(2)：224－235.（in Chinese）

[14] SUN D，KISELEV A，LIAO Q，et al. A new mixed-reality-based teleoperation system for telepresence and maneuverability enhancement[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems，2020，50(1)：55－67.

[15] OPIYO S，ZHOU J，MWANGI E，et al. A review on teleoperation of mobile ground robots：architecture and situation awareness[J]. International Journal of Control，Automation and Systems，2021，19(3)：1384－1407.

[16] KUO C Y，HUANG C C，TSAI C H，et al. Development of an immersive SLAM-based VR system for teleoperation of a mobile manipulator in an unknown environment[J]. Computers in Industry，2021，132：103502.

[17] XIE B，HAN M，JIN J，et al. A generative model-based predictive display for robotic teleoperation[C]// 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE，2021：2407－2413.

(下转第 78 页)

Applied Sciences, 2019, 9: 4643.
[18] 翟军亮. 非饱和土抗剪强度试验与土水特征曲线反演初探[D]. 大连:大连理工大学,2019.
ZHAI Junliang. Shear strength test and preliminary study on retrieving soil-water curve for unsaturated soils[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
[19] KHALILI N, GEISER F, BLIGHT G E. Effective stress in unsaturated soils: review with new evidence[J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4: 115 - 126.
[20] BOL E, ONALP A, OZOCAK A, et al. Estimation of the undrained shear strength of adapazari fine grained soils by cone penetration test[J]. Engineering Geology, 2019, 261: 105277.
[21] MOTAGHEDI H, ARMAGHANI D J. New method for estimation of soil shear strength parameters using results of piezocone [J]. Measurement 2016, 77: 132 - 142.
[22] 黄飞龙,李昕娣,黄宏智,等. 基于 FDR 的土壤水分探测系统与应用[J]. 气象, 2012, 38(6): 764 - 768.
HUANG Feilong, LI Xindi, HUANG Hongzhi, et al. Soil moisture detection system based on FDR and its application[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(6): 764 - 768. (in Chinese)
[23] COSENZA A T. Electromagnetic determination of clay water content: role of the microporosity[J]. Applied Clay Science, 2004,26:21 - 36.
[24] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
[25] 张健, 谢守勇, 刘军, 等. FDR 土壤湿度传感器的温度补偿模型研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(4): 177 - 182.
ZHANG Jian, XIE Shouyong, LIU Jun, et al. Research on the temperature compensation model of the FDR soil moisture sensor [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(4): 177 - 182. (in Chinese)

(上接第 31 页)

[18] ZHOU T, ZHU Q, DU J. Intuitive robot teleoperation for civil engineering operations with virtual reality and deep learning scene reconstruction[J]. Advanced Engineering Informatics, 2020, 46: 101170.
[19] CHEN Y, ZHANG B, ZHOU J, et al. Real-time 3D unstructured environment reconstruction utilizing VR and Kinect-based immersive teleoperation for agricultural field robots[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 175: 105579.
[20] RAMALINGAM B, MANUEL V H, ELARA M R, et al. Visual inspection of the aircraft surface using a teleoperated reconfigurable climbing robot and enhanced deep learning technique[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2019.
[21] KAMEZAKI M, YANG J, SATO R, et al. A situational understanding enhancer based on augmented visual prompts for teleoperation using a multi-monitor system[J]. Automation in Construction, 2021, 131: 103893.
[22] 薛金林, 卫瑶瑶, 闫嘉,等. 基于无线网络的拖拉机遥操作系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 395 - 402.
XUE Jinlin, WEI Yaoyao, YAN Jia, et al. Design of wireless network for tractors based on teleoperation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 395 - 402. (in Chinese)
[23] LI T, ZHENG K, XU K, et al. Revisiting acknowledgment mechanism for transport control: modeling, analysis, and implementation[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2021, 29(6): 2678 - 2692.
[24] 郑立华,王露寒,王敏娟,等. 基于 Kinect 相机的油麦菜自动化三维点云重建[J]. 农业机械学报,2021,52(7):159 - 168.
ZHENG Lihua, WANG Luhan, WANG Minjuan, et al. Automated 3D reconstruction of leaf lettuce based on Kinect camera[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(7):159 - 168. (in Chinese)
[25] 马保建,鄢金山,王乐,等. 基于骨架点的矮化密植枣树三维点云自动配准[J]. 农业机械学报,2021,52(9):24 - 32.
MA Baojian, YAN Jinshan, WANG Le, et al. Three-dimensional point cloud automatic registration for dwarf and dense planted jujube tree based on skeleton points[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):24 - 32. (in Chinese)
[26] VÁZQUEZ-ARELLANO M, PARAFOROS D S, REISER D, et al. Determination of stem position and height of reconstructed maize plants using a time-of-flight camera[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 154: 276 - 288.
[27] 张伟洁, 刘刚, 郭彩玲,等. 基于三维点云的苹果树叶片三维重建研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 103 - 109.
ZHANG Weijie, LIU Gang, GUO Cailing, et al. Apple tree leaf three-dimensional reconstruction based on point cloud[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 103 - 109. (in Chinese)
[28] EDELSBRUNNER H, KIRKPATRICK D, SEIDEL R. On the shape of a set of points in the plane[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 29(4): 551 - 559.
[29] LEE D T, SCHACHTER B J. Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation[J]. International Journal of Computer & Information Sciences, 1980, 9(3): 219 - 242.
[30] ŽALIK B. An efficient sweep-line Delaunay triangulation algorithm[J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(10): 1027 - 1038.