

基于 Vive VR 的遥操作机械手

(申请清华大学学位论文)

培养单位:

学 科:

研 究 生: 张 庭 梁

指 导 教 师:

二〇一九年三月

Vive VR Based Robot Remote Control System

Dissertation Submitted to
Tsinghua University
in partial fulfillment of the requirement
for the professional degree of
Doctor of Engineering

by
Zhang Tingliang
(Computer Science and Technology)

Dissertation Supervisor :

March, 2019

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：

清华大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：(1) 已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；(2) 为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容；(3) 根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》，向国家图书馆报送可以公开的学位论文。

本人保证遵守上述规定。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

作者签名: _____

导师签名: _____

日 期: _____

日 期: _____

摘要

随着机器人技术的发展，机器人的应用场景越来越多。但是目前自动控制机器人尚不能执行多数复杂任务，特别是抢险救灾等需要随机应变的任务，这种情况下需要遥控操作机器人。

目前机械臂远程控制普遍采用手柄或键盘控制方式，且监控方式普遍为摄像头图像显示在监视器上，与现场操作差别很大。

为此，我们开发了一套用 VR 设备远程控制机器人的系统以及配套的三维实时场景采集及图传系统，使操作者能有身临其境的操作体验，大幅降低成本的同时减小了延迟。

我们采用双目摄像头采集实时场景信息，两个目采集到的图像对应到 VR 眼镜的两个显示屏中，同时多自由度双目支架保证双目朝向和操作者双眼朝向一致，从而简单的使操作者可以看到实时的立体场景。

虚拟现实头盔和追踪器上的红外定位模块精确的确定了它们的绝对位置，由此可得它们的相对位置，我们可以使机械臂末端和双目摄像头的相对位置和其一致，从而实现操作者直接用手的位置来控制机械臂。

创新点及优势：

- 我们开发的由双目摄像头及 VR 显示系统组成的三维实时场景采集系统较图像拼接和场景重构实时性好，且对算力要求不高。
- 手持 Vive 追踪器操作机械臂末端符合我们日常使用手进行操作的习惯。较外骨骼和 Optitrack 运动捕捉系统廉价，且能够满足绝大部分需求。

经测试，本系统延迟很低，操作简单，且方便迁移至其他系统。

此系统可以帮助技术人员远程执行任务，而无需复杂的遥控操作培训和练习。未来可以用于航天，拆弹，救援，深海作业，远程交互等领域。

DEMO 视频：

<https://www.bilibili.com/video/av22793262/>

https://www.youtube.com/watch?v=FyyUoBJ_JLY

关键词：虚拟现实；远程控制；机器人

Abstract

With the development of robotics, there are more and more application scenarios for robots. However, at present, robots that are controlled automatically cannot perform most of the complex tasks. In this case, robots must be operated remotely.

At present, the remote control of the robotic arm generally adopts a handle or a keyboard control method, and the monitoring method is generally that the camera image is displayed on the monitor, which is very different from the on-site operation.

To this end, we have developed a system for remotely controlling robots with VR devices and an associated three-dimensional real-time scene acquisition and image transmission system that enables operators to have an immersive operating experience that significantly reduces costs while reducing latency.

We use a binocular camera to collect real-time scene information. The images collected by the two targets correspond to the two display screens of the VR glasses. At the same time, the multi-degree-of-freedom binocular support ensures that the binocular orientation and the eyes of the operator are the same, thus making it simple to use. The operator can see real-time stereoscopic scenes.

The infrared positioning module on the virtual reality helmet and tracker accurately determines their absolute positions, and thus their relative positions can be obtained. We can make the relative positions of the end of the robot arm and the binocular camera coincide with each other, thereby realizing the operator. The position of the hand directly controls the arm.

Innovation and advantages:

- We have developed a three-dimensional real-time scene collection system consisting of a binocular camera and a VR display system. Compared with image stitching and scene reconstruction, the real-time performance is good, and it does not require high computational power.
- Hand-held Vive trackers operate at the end of the arm in line with our habit of using the hand to operate. Compared to the exoskeleton and Optitrack motion capture system is cheap, and can meet most of the needs.

After testing, the system has low delay, simple operation, and easy migration to other

systems.

This system can help technicians perform tasks remotely without complicated tele-operation training and exercises. The future can be used in aerospace, bomb disposal, rescue, deep-sea operations, remote interaction and other fields.

Key words: T_EX; L^AT_EX; CJK; template; thesis

目 录

第 1 章 项目背景	1
第 2 章 创新性产品简介	2
第 3 章 市场分析	3
第 4 章 项目市场前景和社会效益预测分析	5
第 5 章 创业团队基本情况	6
5.1 团队人员	6
5.2 团队技术支持	6
5.3 团队资金支持	6
第 6 章 项目实施风险预测及应对措施	7
6.1 项目普适性	7
6.2 设备调试及维护	7
6.3 资金管理	7
6.4 技术依赖性	7
第 7 章 创始人简介	8
第 8 章 现有系统问题	9
8.1 现有的三维图像采集系统	9
8.2 现有的机器人遥操作系统	9
8.2.1 计算机指令或手柄控制	9
8.2.2 OptiTrack 动作捕捉系统	10
8.2.3 T-HR3 人形机器人遥操作系统	11
第 9 章 系统简介	12
9.1 VR 远程监视系统	13
9.2 Vive 追踪器遥操作系统	13
第 10 章 项目展示	15
10.1 实时图像采集与显示系统	15
10.2 机械臂遥控与执行机构（Vive+DOBOT 机械臂）	16
10.3 机器人遥控与执行机构（NAO 人形机器人）	17
10.4 总结	17

目 录

第 11 章 技术细节	19
11.1 实时图像采集与显示系统	20
11.2 机械臂控制系统	20
11.2.1 点对点移动:	21
11.2.2 基于运动方向的移动:	22
11.3 NAO 机器人控制系统.....	23
第 12 章 展望	25
12.1 改进	25
12.2 应用	25
插图索引	26
表格索引	28
公式索引	29
参考文献	30
致 谢	31
声 明	32
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果	33

主要符号对照表

VIVE	HTC 公司开发的一套 VR 设备，包括头戴式显示器和手持追踪器
ZED	Stereolabs 出品的双目摄像头，与人眼各参数类似
DOBOT	越疆魔术师，由越疆科技研发的高精度机械臂，具有 3 个自由度
NAO	NAO 高 58 厘米，是 SoftBank Robotics 推出的第一款类人机器人
TX1	NVIDIA Jetson TX1，AI 超级计算机，采用 NVIDIA Maxwell 架构，具有 256 颗 NVIDIA CUDA 核心和 64 位 CPU
OptiTrack	NaturalPoint Inc 出品的工业级动作捕捉系统，使用数十个高速红外相机确定物体上反光球的位置，较昂贵
Google Jump	Google 的图像拼接系统，装备有 16 个独立的相机。可以创建 360 度全景，并用于虚拟现实设备。
Omni 轮	即全向轮，在圆周上与转动方向垂直的具有小圆盘的轮子，其效果是，车轮可以纵向驱动，但也可以轻松横向滑动。
GoPro	一种运动摄像机，因其体积小，视野宽，分辨率高等特点，受到全景摄像解决方案青睐
T-HR3	丰田于 2017 年 11 月最新出的人形机器人，通过外骨骼和数据手套远程控制
MMS	远程控制 (Master Maneuvering System)
Google Cardboard	Google 所开发的折叠式纸板头盔，与智能手机配合使用的虚拟现实头戴式显示器。
CUDA	Compute Unified Device Architecture，统一计算架构，由 NVIDIA 所推出的一种集成技术，使 GPU 能够解决复杂的计算问题
HMD	head-mounted display 头戴式显示器

第1章 项目背景

随着机器人技术的发展，机器人的应用场景越来越多。但是目前自动控制机器人尚不能执行多数复杂任务，特别是抢险救灾等需要随机应变的任务，这种情况下需要遥控操作机器人。目前机器人远程控制普遍采用手柄或面板（如图1.1）控制方式，且监控方式普遍为摄像头图像显示在监视器上，与现场操作差别很大。

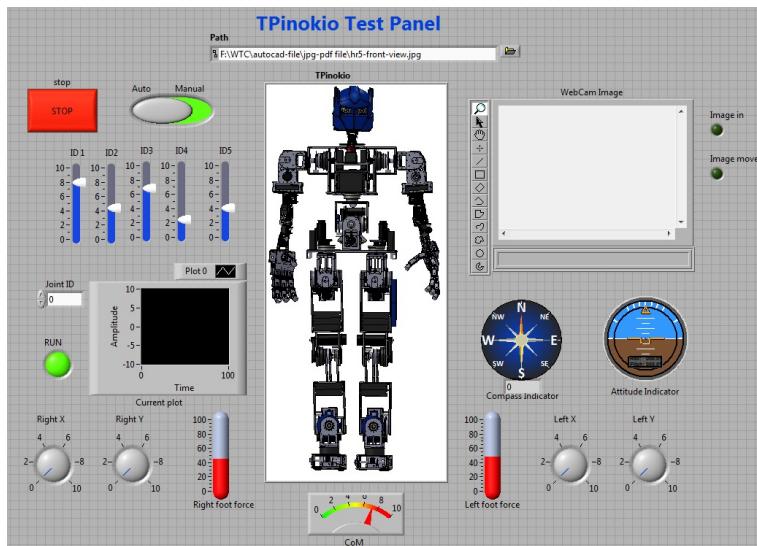


图1.1 双足人形机器人控制面板

现有的基于动作捕捉的遥控操作系统如OptiTrack和机械外骨骼等，虽然用户体验很好，但是成本极高，依赖性强，无法大规模应用。

现有的实时VR显示大多基于图像拼接，图像采集设备昂贵，实时性和图像质量无法同时兼顾，且对算力要求很高。

本作品提出了一种廉价、低延时的遥控操作系统，其双目摄像头及VR显示系统可使操作者看到具有立体感的实时画面，手持追踪器操作机械臂末端符合人类日常使用手进行操作的习惯，可以给予操作者以身临其境的操作体验。

本项目已获得35届清华大学挑战杯校级二等奖（专场第四）以及2018年中美创客大赛北京赛区二等奖（排名第三）

第2章 创新性产品简介

项目创新性地提出了一种新型的机械臂、机器人控制理念。

不再使用传统的按键或者摇杆控制机械臂，而是采用 VR 设备进行操控。这种操控方式相对于传统的机械臂操控方式更加容易上手，对于用户更加友好。用户可以轻易地如同控制身体姿态一样控制机械臂（在使用 VR 设备时，实际上就是控制自身身体状态来控制机械臂）。双目摄像头加上多自由度摄像头平台组成的图像获取方式相对于全景相机有成本更加低廉，处理容易，延迟时间短等优点。

使用双目摄像头实时采集场景信息并对应传输至 VR 设备中，操作者可以看到立体的图像。使用 Vive 追踪器精确定位人手与人眼的相对位置，并由机器手做出对应的操作，符合人的自然操作方式。

由于可移植性很好，这套系统可以用于各种形态的机器人上，包括远程手术机器人，空间站机械臂等新兴机器人，将来可以和各类机器人公司合作。

第3章 市场分析

根据 IFR 统计，2016 年全球工业机器人本体销售额首次突破 132 亿美元（加上系统集成部分，整个工业机器人市场约 500 亿美元），随着主要经济体自动化改造进行，全球工业机器人使用密度大幅提升。根据 IFR 预测，2017-2020 年世界机器人销量分别为 34.7、37.8、43.5、52.2 万台，未来 4 年 CAGR 达到 15.4%。



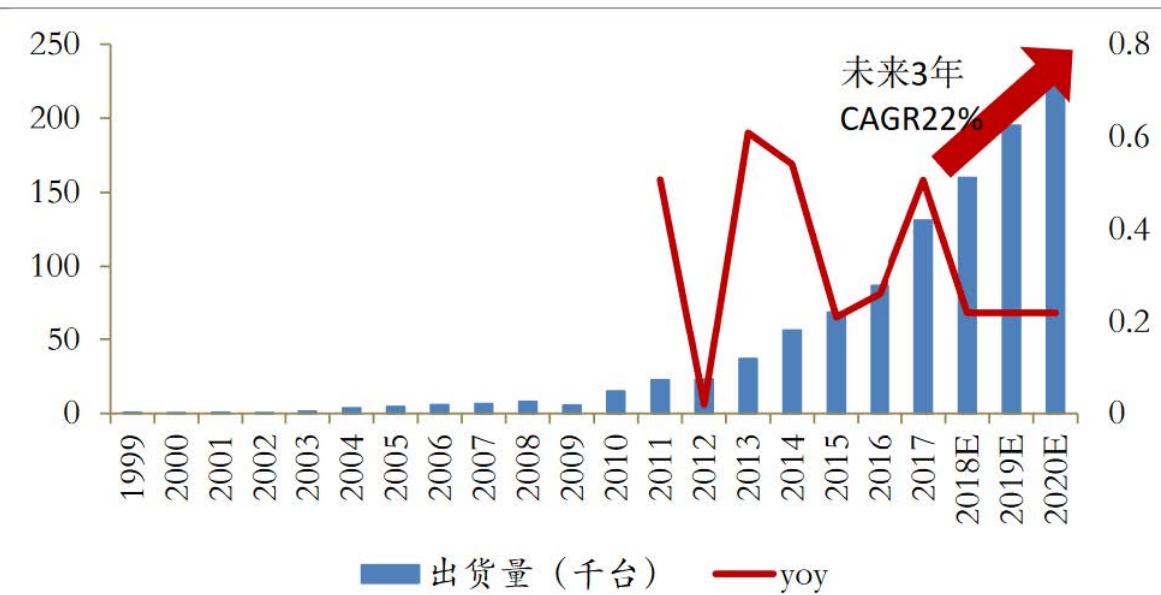
资料来源：IFR, 太平洋研究院整理

图 3.1 1

根据数据统计，2016 年国内工业机器人销售再度创出新高，达到 8.7 万台，而截止 2017 年 12 月，我国工业机器人产量达到 13.1 万台(套)，同比增长 51%，预计今年销量继续高增长。根据 IFR 预测，2018-2020 年国内机器人销量将分别为 16、19.5、23.8 万台，未来 3 年 CAGR 达到 22%。

2017 年国内工业机器人市场增长迅猛有两个原因，一个是苹果大年带动 3C 领域对机器人的需求，另一个就是一般制造业在大规模尝试使用机器人，很多一般制造业企业，比如酿酒厂，一次订货都在百台以上。招工难、招工成本高的问题愈加普遍，使得机器人需求爆发增长。

为了增加工业机器人的使用场景，使得机器人更加柔性化。DFKI（德国人工智能研究中心，是德国顶级的人工智能研究机构，也是目前世界上最大的非营利



资料来源：《机器人技术与应用》，太平洋研究院整理

图 3.2 2

人工智能研究机构，其股东包括 Google、Intel、微软、宝马、SAP、Airbus 在内的全球前十的顶级科技企业）研究出了智能抓取与装配机器人，可以通过抽象记忆系统用于自适应抓取与智能产品装配，具体而言，就是在头部安装立体相机，在手臂靠近物体的地方安装摄像头；同时，利用左手内部天线从产品内部读取尺寸、重量和加热点。

第4章 项目市场前景和社会效益预测分析

服务对象：

机器人制造产业，我们的目标企业包括医疗领域的相关企业以及一些进行高危作业的企业。遥操作机械臂能够很好地解决精密操作、高危操作遇到的问题，保证了操作人员的安全。同时，这些企业对于成本并不敏感，可以购买高端的 VR 设备。

科技前景：

目前，VR 产业高速发展，不仅在娱乐方面大有用途，在工业上也有很大的前景。通过 VR 设备，可以在远离被操作目标的地方身临其境的看到现场的情况，然后通过机械臂进行操作。在最大程度上保证了操作人员的安全。在这个人力成本高涨、生命至上的现在，这个遥操作机械臂有现实意义。

竞争对手：

目前的有一些做远程控制机械臂的公司，但并没有使用 VR 的技术优势：

使用 VR 技术，使得操作人员身临其境

社会效益：

从安全角度来讲，我们的产品将极大改善遥操作者的用户体验，具有很高的现实意义从产品角度来讲，我们的产品能够有效地提高精度，保证安全并提高效益。

第5章 创业团队基本情况

5.1 团队人员

创业团队主要由研发部门、外形设计团队和营销部门组成，未来可能加入外联团队等，根据具体需要而定。研发部门由6人组成，分别来自电机系、机械系、热能系，分工不同。基本分工如下：

姓名	院系	工作范围
张庭梁	电机系	统筹并参与研发
刘寒玉	电机系	双目摄像头平台与机械臂控制
李明轩	电机系	Hmd 头盔与手柄坐标传输
陈灵灵	机械系	全向轮平台调试
梁露露	电机系	材料处理
胡克勤	热能系	VR 设备调试
桑宛萱	机械系	机械结构设计

5.2 团队技术支持

团队技术主要为团队人员自行研究，并由清华大学学生兴趣团队天空工场及清华大学技术创新创业辅修专业智能硬件班提供技术支持，如有相关问题将咨询指导老师。

5.3 团队资金支持

目前团队的设备主要是学校社团的固定资产，未来为研发商业化产品，需要购买一些额外的设备，并尝试其他的设计。

第 6 章 项目实施风险预测及应对措施

6.1 项目普适性

本项目是基于手柄的空间坐标位置而对机械臂/机器人进行遥操作，因此所操控的机械臂/机器人需要有基于空间坐标进行运动的能力，普适性可能有所限制。在现有系统基础上对输出坐标进行处理，设计出基于运动方向的遥控方式。再开发出一套基于摇杆等控制器的要操作系统，使用户可自由选择操作方式。

6.2 设备调试及维护

由于整套系统较为复杂，任何一个子系统出现问题都可能会使整套系统失效，因而需要对系统中各环节可能出现的问题进行整理。在之前的系统构建、设备调试等过程中已经发现各子系统的一些相对常见的问题，之后需要进一步进行反复测试，总结、消除常见问题，并写出较为完善的使用说明。

6.3 资金管理

由于该项目中 VR、人形机器人等设备具有较高的成本，因而在初期可能会导致投入较多而效益不显著的情况，可能会使得项目初期运营不顺。在项目运行初期尝试应用于较为简单的机械臂等控制设备，等到项目的成效逐渐得以展现时，再将其应用于人形机器人等一些较为复杂的系统。

6.4 技术依赖性

由于本项目是一套基于 VR 的系统，所以具有一定的技术依赖性，需要 HTC Vive 等相关技术支持。后期可改用 KENECT 或 Realsense 体感摄像头采集人体各关节角度信息，并反映到人形机器人上。

第 7 章 创始人简介

张庭梁，清华大学电机系六字班本科生，天空工场兴趣团队理事、未来航空队队长、117 号正式队员，星火计划十二期成员。

第 8 章 现有系统问题

8.1 现有的三维图像采集系统

目前三维场景重构需要很高的算力，分辨率低且不能保证实时性，目前较成熟的实时三维场景采集系统基本上都是基于图像拼接技术：

要创建一个 360 度全景视频，无论是使用特殊的摄像机同时记录场景，还是将多个不同角度的 GoPros^①图像拼接在一起，传入的每个视频文件分辨率是 4K 和更高，总比特率会超过 50 Mb/s。而用于 VR 的 360 度视频的比特率是其两倍，即每小时 44 GB 视频。如果要实时发送和接收这些图像信息，对带宽等网络环境要求非常高。拼接这些图像则会消耗大量的算力，无论是采用立方体（见图 8.1）还是金字塔形拼接方式（见图 8.2）。因此，运算和传输延迟加起来会达到 2s 以上，实时性和图像质量无法同时兼顾。

以 Google Jump（见图 8.3）^②为例，Google Jump 使用 24 个 GoPro，环绕一个圆形分布，考虑到 GoPro 单个相机的价格（2000-3000 人民币）上述系统造价非常昂贵。

8.2 现有的机器人遥操作系统

8.2.1 计算机指令或手柄控制

许多需要人工远程操控的机器人，其操作方式是向控制面板或计算机输入指令而实现。通常情况下，因为机器人自由度很多，常需要事先编好一系列的动作，使用指令调用。

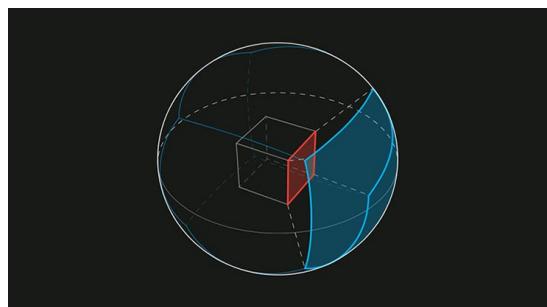


图 8.1 立方体拼接

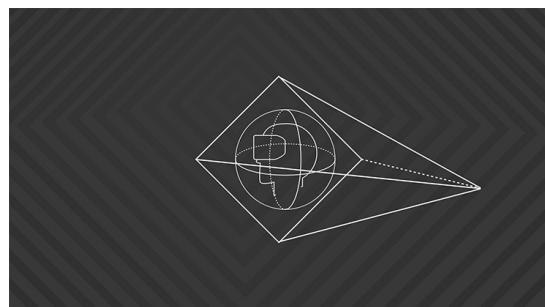


图 8.2 金字塔形拼接

^① 一种运动摄像机，因其体积小，视野宽，分辨率高等特点，受到全景摄像解决方案青睐

^② Google 的图像拼接系统，装备有 16 个独立的相机。可以创建 360 度全景，并用于虚拟现实设备。



图 8.3 Google Jump

手柄常用来控制一些自由度较低的系统，如机械臂，多数是直接控制各关节电机转速，从而实现机械臂控制。

这些传统的远程控制方式对操作者要求很高，操作者需要实现接受一系列培训及练习，以熟悉操作平台，其交互体验不是很理想。

8.2.2 OptiTrack 动作捕捉系统

OptiTrack^①（见图 8.4）是基于一系列红外摄像机的动作捕捉系统解决方案，在操作者身上贴多个感光球，通过四周的十多个红外摄像机来计算每一个感光球的位置，从而获得人的动作数据。



图 8.4 OptiTrack

由于此解决方案需要至少 12 个高速红外摄像机和配套的处理系统，而一个红外摄像机售价 4000-5000 美元，整个系统的成本非常高，用其做机器人控制并不现实。

^① <http://optitrack.com/>

8.2.3 T-HR3 人形机器人遥操作系统

T-HR3(如图 8.5)^①是一种远程机动系统，它通过外骨骼和数据手套将手，手臂和脚部动作映射到机器人。

就操作者近端方面而言，T-HR3 采用机械外骨骼加上双手的数据手套。由于机械外骨骼以力信号作为控制端的输出信号，所以，机械外骨骼和操作者之间本身就存在一定的滞后性，而且，力信号易受外力干扰，所以存在信号不稳定的问题。

更重要的是，T-HR3 需要一套昂贵且笨重的外骨骼，其应用场景十分受限。



图 8.5 T-HR3

^① <https://www.engadget.com/2017/11/21/toyota-t-hr3-robot/>

第9章 系统简介

本作品^①旨在解决现有机器人遥操作系统的上述问题，提出了一套低成本、操作简单、实时性好、可提高用户体验的遥操作解决方案。

如图 9.1 所示：



图 9.1 系统简介

我们采用双目摄像头采集实时场景信息，两个目采集到的图像对应到 VR 眼镜的两个显示屏中，同时多自由度双目支架保证双目朝向和操作者双眼朝向一致，从而简单的使操作者可以看到实时的立体场景，同时降低了成本、减小了延迟。

虚拟现实头盔和追踪器上的红外定位模块精确的确定了它们的绝对位置，由此可得它们的相对位置，我们可以使机械臂末端和双目摄像头的相对位置和其一致，从而实现操作者直接用手的位置来控制机械臂。

该项目可分为两个子系统：图像显示系统及机器人控制系统。

^① 本章节内独创内容均已申请实用新型专利，国家知识产权局电子申请案卷编号：274278199



图 9.2 Vive VR 头盔



图 9.3 Google Cardboard

9.1 VR 远程监视系统

本系统旨在提供一个具有较强立体感的实时全景图像，并解决现有系统的问题以及最大化的降低造价，以使远程操控者获得身临其境的体验。我们用 ZED 双目摄像头来采集实时场景信息，两个目采集到的图像对应到 VR 眼镜的两个显示屏中，而搭载 ZED 的多自由度舵机支架可随操纵者头部的转动而实时旋转，以保证双目摄像头的朝向和操作者双眼朝向一致，从而使操作者可以实时地看到各方位的立体场景。

此系统硬件部分仅由一个双目摄像头，转台，虚拟现实头盔组成，成本低，且部件较常见。双目摄像头可以由两个独立的摄像头替代，只需保证两摄像头间距和瞳距相似即可，随着虚拟现实技术的发展，分辨率较高的 Vive VR 头盔(如图 9.2)价格可以为普通人所接受，Google Cardboard(如图 9.3) 售价则低至 10RMB，需要和智能手机配合使用。

因为只需要传输两个摄像头的图像，并不需要复杂的运算，这套机械式的实时全景系统延迟很小。

9.2 Vive 追踪器遥操作系统

虚拟现实头盔和追踪器上的红外定位模块精确的确定了它们的绝对位置，由此可得它们的相对位置，我们可以使机械臂末端和双目摄像头的相对位置和其一致，从而实现操作者直接用手的位置来控制机械臂。

此系统使得操作者能够利用自身的动作控制机器人的运动，符合人类的行为习惯，因而会带来良好的操作体验。

Vive 虚拟现实套件^①(如图 9.4) 包括 Vive 追踪器, Vive VR 头盔和 Lighting 基站, 官网售价 5488RMB, 远低于 OptiTrack 或 T-HR3 外骨骼部分的售价。而这套系统完全可以胜任大多数任务。而且 Vive VR 套件对环境要求很低, 可以随时搭建操作环境。



图 9.4 Vive 虚拟现实套件

^① <https://www.vive.com/cn/product/>

第 10 章 项目展示

我们首先完成了实时图像采集与显示系统，调试至观看体验最佳；之后我们研究并改写 Dobot 指令集，设计并制做了机械臂末端执行机构，读取了 Vive 坐标，实现用 Vive 远程控制 Dobot，并测试了整套系统；不久前，我们为验证此遥操作系统的可迁移性，成功地将此系统迁移到 NAO 人形机器人上。

下面以时间顺序分阶段介绍我们的成果：

10.1 实时图像采集与显示系统

实现了多自由度机械结构托举的双目摄像头，随着操作者头部的转动而同步转动，以采集实时图像信息（参见视频 1）(如图 10.1)。在这一阶段，我们的 VR 平台暂时使用使用 Google Cardboard（谷歌折叠式纸板虚拟现实显示器）(如图 10.2)。操作者头部姿态数据由其中 Android 手机自身的陀螺仪获取，并发送到舵机的控制端控制舵机转动。

同时，在这一阶段，我们在机械臂末端加上了吸盘执行机构，使用气泵和电磁阀组建了一个吸附装置(见图 10.3)。

同时我们改写了 DOBOT 机械臂底层及接口，解决了串口控制卡顿的问题。实现用遥控器-接收机控制系统，远程完成叠纸杯实验。(参见视频 2)



图 10.1 双自由度机械结构托举的双目摄像头



图 10.2 Google Cardboard

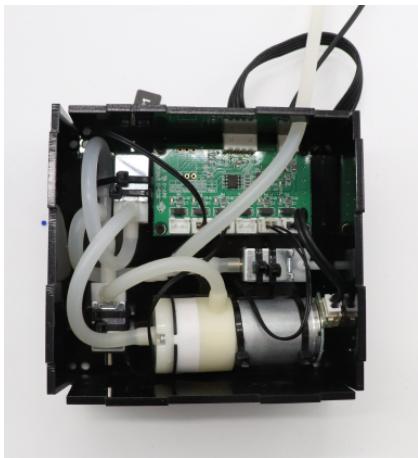


图 10.3 气泵和电磁阀组建的吸附装置

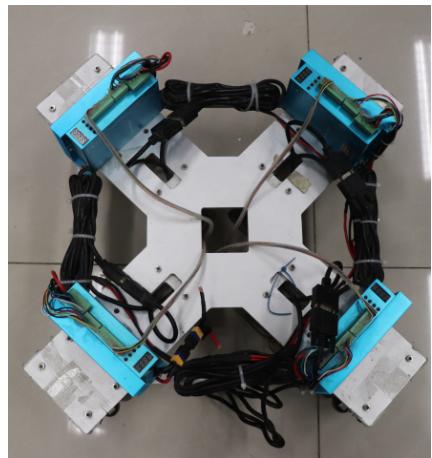


图 10.4 全向轮底盘

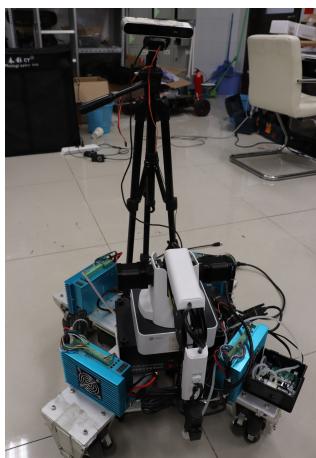


图 10.5 全向轮移动平台

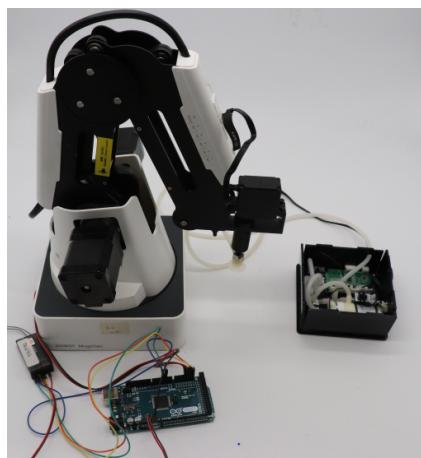


图 10.6 DOBOT 机械臂及通讯系统

10.2 机械臂遥控与执行机构（Vive+DOBOT 机械臂）

在这一阶段，我们完成了一个由全向轮底盘（如图 10.4）移动的机械臂（如图 10.6、10.5），平台上搭载双自由度机械结构托举的 ZED 摄像头，随着操作者头部的转动而同步转动，以采集实时图像信息。我们将上一阶段的基于 Google Cardboard 的系统迁移到了 Vive 虚拟现实头盔上，实现了更清晰的显示效果。

我们可以实现读取追踪器和 VR 头盔绝对位置并通过串口发送。可以看到图 10.7 中输出了左手，右手和头盔的绝对坐标。我们改写了机械臂底层及接口，解决了串口控制卡顿的情况（参见视频 3）。

从而实现了用 Vive 追踪器远程控制机械臂，为了测试机械臂的响应，我们用 Vive 追踪器操控 Dobot 机械手在竖直平面内画一个五角星。

之后，我们使用上述双目摄像头系统和 Vive 配合，远程完成了叠纸杯实验（图 10.8）（参见视频 4）。

```

67221950523, HMD, x = 1.13101, y = 0.14637, z = 0.64883, qw = 0.28464, qx = 0.31602, qy = 0.76442, qz = -0.48453
67221950607, RightHand, x = 1.38123, y = 0.07796, z = 0.99304, qw = 0.70115, qx = 0.06460, qy = -0.69372, qz = 0.15154
67221950911, HMD, x = 1.13101, y = 0.14637, z = 0.64883, qw = 0.28464, qx = 0.31602, qy = 0.76442, qz = -0.48453
67221950993, RightHand, x = 1.38123, y = 0.07796, z = 0.99304, qw = 0.70115, qx = 0.06460, qy = -0.69372, qz = 0.15154
67221951302, HMD, x = 1.13101, y = 0.14637, z = 0.64883, qw = 0.28464, qx = 0.31602, qy = 0.76442, qz = -0.48453
67221951385, RightHand, x = 1.38123, y = 0.07796, z = 0.99304, qw = 0.70115, qx = 0.06460, qy = -0.69372, qz = 0.15154
67221951687, HMD, x = 1.13101, y = 0.14637, z = 0.64883, qw = 0.28464, qx = 0.31602, qy = 0.76442, qz = -0.48453
67221951769, RightHand, x = 1.38123, y = 0.07796, z = 0.99304, qw = 0.70115, qx = 0.06460, qy = -0.69372, qz = 0.15154
67221952070, HMD, x = 1.13101, y = 0.14637, z = 0.64883, qw = 0.28464, qx = 0.31602, qy = 0.76442, qz = -0.48453
67221952153, RightHand, x = 1.38123, y = 0.07796, z = 0.99304, qw = 0.70115, qx = 0.06460, qy = -0.69372, qz = 0.15154
67221960583, HMD, x = 1.13102, y = 0.14637, z = 0.64883, qw = 0.28464, qx = 0.31602, qy = 0.76442, qz = -0.48453
67221960698, RightHand, x = 1.38123, y = 0.07795, z = 0.99304, qw = 0.70119, qx = 0.06459, qy = -0.69368, qz = 0.15155
67221961026, HMD, x = 1.13102, y = 0.14637, z = 0.64883, qw = 0.28464, qx = 0.31602, qy = 0.76442, qz = -0.48453
67221961118, RightHand, x = 1.38123, y = 0.07795, z = 0.99304, qw = 0.70119, qx = 0.06459, qy = -0.69368, qz = 0.15155

```

图 10.7 追踪器和 VR 头盔绝对位置



图 10.8 DOBOT 远程叠纸杯实验

10.3 机器人遥控与执行机构（NAO 人形机器人）

为说明此系统的普适性，我们将此系统成功拓展到机械结构与 Dobot 差别很大的 NAO 人形机器人上，用追踪器控制机器人手臂的运动（图 10.9）。^①成功完成 Vive 远程控制 NAO 的实验（参见视频 5）。

10.4 总结

经以上测试，我们这套系统远程控制实时性很好，视频传输及控制延迟小于 200ms，在 VR 眼镜中有很强的立体感，操作简单，且方便迁移至其他系统。

^① 由于 NAO 自身设计的缺陷（易失去平衡），我们现阶段并没有加入腿部动作，且将手臂动作对称处理

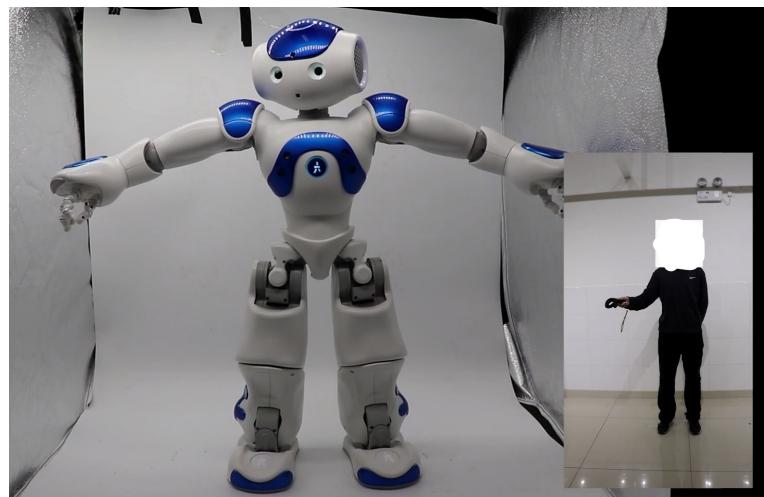


图 10.9 Vive 远程控制 NAO

第 11 章 技术细节

此系统实现了远程操作的完整功能，整个系统硬件层面架构和数据流向分别如图 11.1 和 11.2 所示：

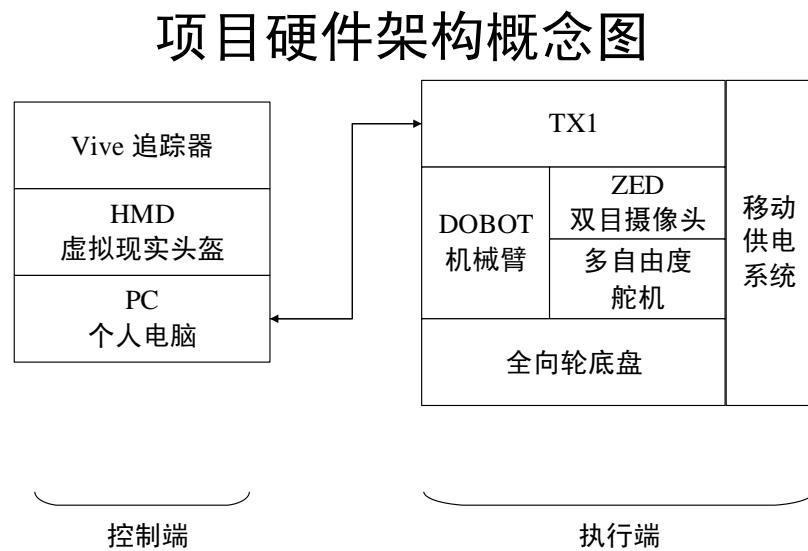


图 11.1 硬件架构总览

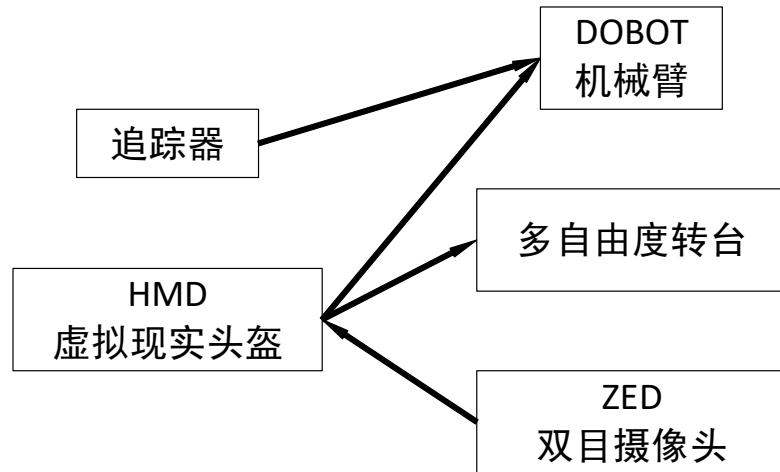


图 11.2 数据流向示意

下面分三部分介绍技术细节。

11.1 实时图像采集与显示系统

ZED 双目摄像头两个目采集到的图像分别投射到 Vive 头盔的两个显示屏中。ZED 双目摄像头搭载在由两个数字舵机组成的双自由度平台上，以保证双目朝向与人眼朝向实时一致。

整个系统放置在 4 轮全向轮底盘上面，ZED 双目摄像头采集到的图像，通过 USB3.0 发送给 Nvidia Jetson TX1^①，TX1 上运行 Ubuntu 系统，图像在 TX1 上处理后，使用 UV4L 服务（User space Video4Linux）^②发送到局域网。同时，Vive VR 头盔的姿态数据通过 HTC 串流盒发送到计算机中进行处理，处理后通过蓝牙串口发送到全向轮车上面的下位机，控制双自由度数字舵机做出与 Vive VR 头盔同步的转动，使安装在双自由度数字舵机平台上的 ZED 双目摄像头的指向与 Vive 头盔实时相同。

ZED 双目相机能够以每秒 15 帧的速度、最高 4416×1242 的分辨率实时产生图像，在低分辨率下最高能够达到 120fps^③，表 11.1 描述了 ZED 在不同模式下的帧率和分辨率。而 Vive 头盔当中左右眼分别为一块分辨率为 1200×1080 的 OLED 屏幕，共 2160×1200 分辨率。为基本与其匹配并能够满足需求，目前 ZED 选用 1080p, 30fps 的运行模式。

表 11.1 ZED 不同模式下帧率，分辨率比较

模式	帧率	分辨率
2.2k	15	4416×1242
1080p	30	3840×1080
720p	60	2560×720
WVGA	100	1344×376

11.2 机械臂控制系统

图 11.3 为 Dobot 各自由度的示意图，机械臂在三维空间中的移动需要用到 joint1、2、3，该三个自由度简化后的模型如图 11.4 所示。

其中 a,b 分别为两个臂的长度，根据官方资料， $a = 135mm, b = 147mm$ 。 α, β, θ 为三个自由度对应的方位角。

① <http://www.nvidia.cn/object/embedded-systems-dev-kits-modules-cn.html>

② <https://www.linux-project.org/uv4l/>

③ 帧每秒

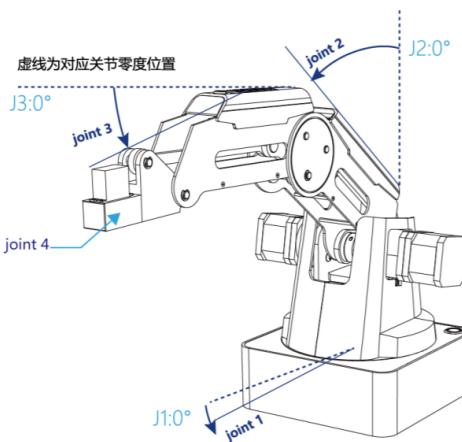


图 11.3 DOBOT 机械臂各自由度的示意图

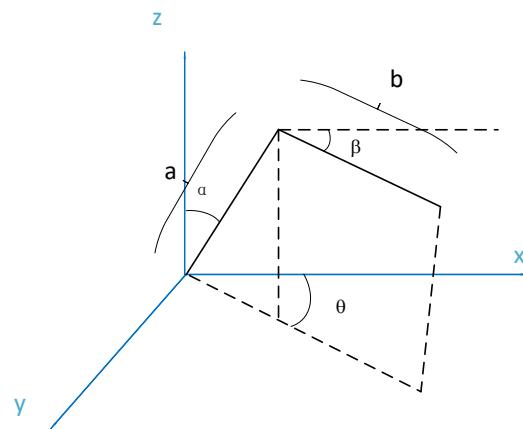


图 11.4 DOBOT 机械臂末端坐标表示示意图

由图 11.4 可得，末端坐标的位置 (x, y, z) 可表示为：

$$\begin{cases} x = (a \times \sin(\alpha) + b \times \cos(\beta)) \times \cos(\theta) \\ y = (a \times \sin(\alpha) + b \times \cos(\beta)) \times \sin(\theta) \\ z = a \times \cos(\alpha) - b \times \cos(\beta) \end{cases}$$

可见，任意一组给定的 x, y, z 坐标都有唯一的一组 α, β, θ 与之对应，只要得到方位角与坐标之间的关系即可将机械臂移动到其可触及的任意位置。

11.2.1 点对点移动：

联立以上方程组，解得：

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{x^2 + y^2 + z^2 - b^2}{2a\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}\right) - \arcsin\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}\right) \quad (11-1)$$

$$\beta = -\arcsin\left(\frac{x^2 + y^2 + z^2 - a^2}{2b\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}\right) + \arccos\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}\right) \quad (11-2)$$

由求出的 α 、 β 可得到

$$\theta = \arcsin\left(\frac{y}{a \times \sin \alpha + b \times \cos \beta}\right) \quad (11-3)$$

由此可将任意一点的 (x, y, z) 坐标用机械臂三个自由度的方位角 (α, β, θ) 来表示，因而可通过各关节的转动而实现点对点运动。即初始坐标为 (x_1, y_1, z_1) ，目的坐标为 (x_2, y_2, z_2) ，则可用上述方法计算出相应的 $(\alpha_1, \beta_1, \theta_1), (\alpha_2, \beta_2, \theta_2)$ ，从而得知各关节需转动的角度。

11.2.2 基于运动方向的移动：

机械臂在 (x, y, z) 坐标系中各轴的速度分量也可由 (α, β, θ) 坐标系中的角速度表示：

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt} \\ &= \frac{\delta x}{\delta \alpha} \frac{\delta \alpha}{\delta t} + \frac{\delta x}{\delta \beta} \frac{\delta \beta}{\delta t} + \frac{\delta x}{\delta \theta} \frac{\delta \theta}{\delta t} \\ &= a \cos \alpha \cos \theta w_\alpha - b \sin \beta \cos \theta - (a \sin \alpha + b \cos \beta) \sin \theta w_\theta \end{aligned}$$

同理可得：

$$v_y = a \cos \alpha \sin \theta w_\alpha - b \sin \beta \sin \theta + (a \sin \alpha + b \cos \beta) \cos \theta w_\theta$$

$$v_z = -a \sin \alpha w_\alpha - b \cos \beta w_\beta$$

用矩阵形式表示，即：

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cos \alpha \cos \theta & -b \sin \beta \cos \theta & -(a \sin \alpha + b \cos \beta) \sin \theta \\ a \cos \alpha \sin \theta & -b \sin \beta \sin \theta & (a \sin \alpha + b \cos \beta) \cos \theta \\ -a \sin \alpha & -b \cos \beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_\alpha \\ w_\beta \\ w_\theta \end{bmatrix}$$

简写为 $\mathbf{V} = A\mathbf{w}$

由于任意时刻机械臂都有确定的方位角，故 A 为已知量，因而给定一组目的速度矢量 (v_x, v_y, v_z) 可以求出各关节的速度。

11.3 NAO 机器人

项目中为了控制机器人的手臂，结合手臂的参数来计算各关节的速度。当各关节（不包括手指部分）的运动速度给定后，会出现手臂姿态与端点速度不一致的情况。因此，必须使各关节与端点的坐标实现一一对应。

机器人手臂的端点速度由 NAO 机器人手臂（不含手指部分）的目标坐标点的速度决定。各关节与端点的坐标实现一一对应。



图 11.5 NAO 机器人

对于机器人的姿态设定、手臂末端的设定涉及到机器人的控制理论。每个关节有相应的标准坐标系来解读链接和位置以及决定关节转换的基本程序。从参考点开始到第一个关节，再最终到最后一个关节完成转换后可以得到机械臂的转换矩阵。利用这个转换矩阵可以根据手臂末端的目标位置得到每个关节的转动参数。

我们主要采用 Denavit Hartenberg (DH) 来进行运动学的计算。根据厂家提供的机器人的手臂参数（如长度等），得到每个关节 n 的转换矩阵 A_n

$$A_n = \begin{bmatrix} C_{\theta_n} & -S_{\theta_n}C_{\alpha_n} & S_{\theta_n}S_{\alpha_n} & a_nC_{\theta_n} \\ S_{\theta_n} & C_{\theta_n}C_{\alpha_n} & -C_{\theta_n}S_{\alpha_n} & a_nS_{\theta_n} \\ 0 & S_{\alpha_n} & C_{\alpha_n} & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11-4)$$

其中 $C_{\theta_n} = \cos(\theta_n), S_{\theta_n} = \sin(\theta_n)$, θ_n 为官方给出的旋转角, a_n 为两个关节参考坐标系中坐标轴交界口的距离, d_n 为两个关节在同意旋转轴上的距离, 这些数据都可以在 NAO 的数据手册中查询到。

为了根据目的点的坐标分离方程, 以得到各个关节的转动值, 我们将变换矩阵 "An" 的逆矩阵相乘于关系方程的左边来取得计算角度值的元素。右手包含五个关节, 从上到下分别是肩膀关节 (RShoulderPitch, RShoulderRoll 两个), 手肘关节 (elbow RElbowRoll, RElbowYaw 两个), 和手腕关节 (RWristYaw)。因此, 表示从肩膀到手腕各关节的转动矩阵为 ${}^w_s T$

$${}^w_s T = A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4 \times A_5 \quad (11-5)$$

$$A = A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4 \times A_5 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11-6)$$

然后我们通过逐步乘以 A_i^{-1} 的方式得到各个关节的变换矩阵 A, 进而可以通过以下公式得到每个关节的转动参数。

$$Pos_w = A \times Pos_s \quad (11-7)$$

由以上方程并结合 NAO 的链接关节变量数据 (在 NAO 官网上提供), 我们可以根据目的点得到每个关节点旋转的角度, 从而达到基于逆运动学控制机器人的机械臂。

第 12 章 展望

12.1 改进

下一阶段，我们将从以下几个方面改进该系统：

- 给 NAO 编写行走程序，加入闭环反馈，从软件层面提高 NAO 的稳定性
- 采集每次操作的数据，使用增强学习训练机器人自主地执行任务。
- 加上手势识别元件实现机器人手部的动作，进一步完善机器人的功能。

12.2 应用

随着科技技术的不断发展，人类正向许多未知的领域前进，而这个过程注定危险重重。如深水、深地层、外层空间、强放射、高真空等新的生产和作业领域。由于自动控制尚无法独立执行复杂任务，此系统可以帮助技术人员远程执行任务，而无需复杂的遥操作培训和练习。

例如，随着航天事业的发展，如今空间站中的宇航员可能需要完成各种危险的出舱任务。在这种情况下，就可以采用本技术，在太空舱中遥控机器人在舱外完成本来艰巨危险的任务。（如图 12.1）

未来此技术可以用于航天，拆弹，救援，深海作业，远程交互等领域。



图 12.1 国际空间站的机械臂（可以帮助宇航员在太空中举起大型物体）

插图索引

图 1.1 双足人形机器人控制面板	1
图 3.1 1	3
图 3.2 2	4
图 8.1 立方体拼接.....	9
图 8.2 金字塔形拼接.....	9
图 8.3 Google Jump.....	10
图 8.4 OptiTrack	10
图 8.5 T-HR3	11
图 9.1 系统简介	12
图 9.2 Vive VR 头盔	13
图 9.3 Google Cardboard	13
图 9.4 Vive 虚拟现实套件	14
图 10.1 双自由度机械结构托举的双目摄像头	15
图 10.2 Google Cardboard	15
图 10.3 气泵和电磁阀组建的吸附装置	16
图 10.4 全向轮底盘.....	16
图 10.5 全向轮移动平台	16
图 10.6 DOBOT 机械臂及通讯系统	16
图 10.7 追踪器和 VR 头盔绝对位置	17
图 10.8 DOBOT 远程叠纸杯实验	17
图 10.9 Vive 远程控制 NAO	18
图 11.1 硬件架构总览	19
图 11.2 数据流向示意	19

图 11.3 DOBOT 机械臂各自由度的示意图	21
图 11.4 DOBOT 机械臂末端坐标表示示意图	21
图 11.5 NAO 机器人	23
图 12.1 国际空间站的机械臂（可以帮助宇航员在太空中举起大型物体）	25

表格索引

表 11.1 ZED 不同模式下帧率，分辨率比较 20

公式索引

公式 11-1	22
公式 11-2	22
公式 11-3	22
公式 11-4	24
公式 11-5	24
公式 11-6	24
公式 11-7	24

参考文献

- [1] Chamy L A, Dine M S E, Rafeii A E K E, et al. Infinity of controls with intelligent robot remote control[C]//2017 Sensors Networks Smart and Emerging Technologies (SENSET). 2017: 1–3.
- [2] Yan B, Shi D, Wei J, et al. Hibot: A generic ros-based robot-remote-control framework[C]//2017 2nd Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS). 2017: 221–226.
- [3] Yang X, Petriu D C, Whalen T E, et al. A web-based 3d virtual robot remote control system[C]// Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2004 (IEEE Cat. No.04CH37513): volume 2. 2004: 955–958 Vol.2.
- [4] Xuhui Z, Runlin D, Yongwei L. Vr-based remote control system for rescue detection robot in coal mine[C]//2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). 2017: 863–867.
- [5] Cho K, Ko K, Shim H, et al. Development of vr visualization system including deep learning architecture for improving teleoperability[C]//2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). 2017: 462–464.
- [6] Qin X, Jiang B, Deng X, et al. A robot remote control system based on vpn and tcp/ip protocol [C]//2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2008: 285–289.
- [7] Zhao L, Li X, Sun Z, et al. A robot navigation method based on human-robot interaction for 3d environment mapping[C]//2017 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR). 2017: 409–414.
- [8] Toyota's t-hr3 robot mimics your movements[EB/OL]. <https://www.engadget.com/2017/11/21/toyota-t-hr3-robot/>.
- [9] Vive | discover virtual reality beyond imagination[EB/OL]. <https://www.vive.com/us/>.
- [10] Optitrack - motion capture systems[EB/OL]. <http://optitrack.com/>.
- [11] Kuzyakov E. Under the hood: Building 360 video[EB/OL]. <https://code.facebook.com/posts/1638767863078802/under-the-hood-building-360-video/>.
- [12] SoftBank. Discover nao, the little humanoid robot from softbank robotics | softbank robotics [EB/OL]. <https://www.ald.softbankrobotics.com/zh/xuan-ku-ji-qi-ren/naoshi-shui>.
- [13] NASA. Robotic arm | nasa[EB/OL]. https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/dictionary/Robotic_Arm.html.

致 谢

致 谢

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名： _____ 日 期： _____

个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果

个人简历

发表的学术论文

- [1] Yang Y, Ren T L, Zhang L T, et al. Miniature microphone with silicon- based ferroelectric thin films. Integrated Ferroelectrics, 2003, 52:229-235. (SCI 收录, 检索号:758FZ.)
- [2] 杨轶, 张宁欣, 任天令, 等. 硅基铁电微声学器件中薄膜残余应力的研究. 中国机械工程, 2005, 16(14):1289-1291. (EI 收录, 检索号:0534931 2907.)
- [3] 杨轶, 张宁欣, 任天令, 等. 集成铁电器件中的关键工艺研究. 仪器仪表学报, 2003, 24(S4):192-193. (EI 源刊.)
- [4] Yang Y, Ren T L, Zhu Y P, et al. PMUTs for handwriting recognition. In press. (已被 Integrated Ferroelectrics 录用. SCI 源刊.)
- [5] Wu X M, Yang Y, Cai J, et al. Measurements of ferroelectric MEMS microphones. Integrated Ferroelectrics, 2005, 69:417-429. (SCI 收录, 检索号:896KM)
- [6] 贾泽, 杨轶, 陈兢, 等. 用于压电和电容麦克风的体硅腐蚀相关研究. 压电与声光, 2006, 28(1):117-119. (EI 收录, 检索号:06129773469)
- [7] 伍晓明, 杨轶, 张宁欣, 等. 基于 MEMS 技术的集成铁电硅微麦克风. 中国集成电路, 2003, 53:59-61.

研究成果

- [1] 任天令, 杨轶, 朱一平, 等. 硅基铁电微声学传感器畴极化区域控制和电极连接的方法: 中国, CN1602118A. (中国专利公开号)
- [2] Ren T L, Yang Y, Zhu Y P, et al. Piezoelectric micro acoustic sensor based on ferroelectric materials: USA, No.11/215, 102. (美国发明专利申请号)