

项目编号: T030PRP32053

上海交通大学

本科生研究计划 (PRP) 研究论文  
(第 32 期)

论文题目: 基于沉浸式环境的立体操控替身机器人开发

项目负责人: 王坤东 学院 (系): 电子信息与电气工程学院

指导教师: 王坤东 学院 (系): 电子信息与电气工程学院

参与学生: 李可、张舒来

项目执行时间: 2017 年 6 月至 2018 年 1 月

## 基于沉浸式环境的立体操控替身机器人开发

学院：电子信息与电气工程学院 姓名：李可 学号：516021910494

指导教师：王坤东 学院：电子信息与电气工程学院

### 摘要

科学技术的高速发展引领我们进入智能化时代，而随着高科技和信息技术的广泛应用，人们对自己的工作环境要求也是越来越高。因此，基于 VR 技术、具有交互性、自由化的沉浸式环境成为未来一些危险环境下应用替身机器人代替人去完成各类设施维护、检查、监测、救援等任务中的关键技术。本文从原理上介绍了沉浸式环境及其实现方案，在结合了体感控制和虚拟现实技术后提出沉浸式立体操控替身机器人的新概念并分别从机械控制系统、姿态数据的获取和沉浸式环境构建三个部分进行详细阐述。

基于沉浸环境的立体操控替身机器人开发的具体原理是：利用单片机和多个舵机联合组成多个自由度运动的机械臂和摄像头，并通过 PWM 信号对其实现控制；利用陀螺仪姿态传感设备获取头部及手臂姿态数据，结合单片机和舵机组成体感控制系统，实现对摄像头和机械臂的沉浸式体感控制；利用两个摄像头从不同角度同时拍摄来产生 3D 图像，经过图像传输，通过虚拟现实技术的显示设备来构建立体沉浸式环境。

本项目致力于使替身机器人的工作更加安全、可靠和高效，以缓解危险场景下人的工作压力。

**关键词：**沉浸式环境，姿态数据获取，机械臂，双目摄像头

### ABSTRACT

Rapid development of science and technology leads us to a new intelligentized era. With the widespread application of high-technology and information technology, people are paying more and more attention to their working conditions. Thus, interactive and liberalized immersive environment based on the technology of VR is becoming the pivotal technology for using replacement robots to complete some tasks in dangerous environment in the future, such as maintenance and examination of equipment, detection and rescue. This paper introduces immersive environment and its application in principle and put forward a new concept of Immersive Stereometric Manipulation Replacement Robot based on the technology of motion control and virtual reality. The paper analyses our work in detail from the perspectives of mechanical control system, acquirement of posture data and establishment of immersive environment.

The specific principles of development of stereometric manipulation replacement robot based on immersive environment are as follows: use Arduino and several steering engines to construct mechanical arms and cameras, which are manipulated with PWM signals; use gyroscope sensors to acquire posture data of the head and arms; use two cameras to capture images from two different angles to generate 3-dimension images and establish immersive environment throughout VR.

This project is designed to make the work of replacement robots more safe, reliable and efficient to relieve people's pressure under some dangerous working conditions.

**KEY WORDS:** Immersive environment, Acquirement of posture data, Mechanical arms, Binocular cameras

## 1. 绪论

随着科学技术的高速发展以及信息量的急速膨胀,在大规模科学计算可视化、计算机支持的远程医疗、军事应用、实时监测等诸多领域,人们对视频质量及显示技术的要求越来越高,对于信息的需求已不满足于从外部观察信息处理的平面化的影像,而希望能够更主动、自由地控制图像观察角度和位置,得到一种沉浸式的环境体验。

科学技术的发展同样推动了替身机器人的发展,人们越来越期望开发出完美的可以由人远程操控、代替人们在一些危险的环境中完成设备检测、监控、救援等工作的替身机器人,以减小人员在这种环境下的人身受到伤害的可能性。随着计算机技术与高性能计算、人机交互技术与设备、计算机网络与通信等科学技术领域的突破和高速发展,以计算机技术为核心,运用计算机视觉和图形学而产生的虚拟现实技术、三维体感信息交互技术等在全球已成为一种热门,因此,研究一种使观察者可以自由选择观察方向和视角并能够通过体感控制系统与机械设备进行交互的沉浸式替身机器设备在如今已经是极其迫切的任务了。

### 1.1 国内外概况

立体沉浸式替身机器人的概念源于沉浸式视频和虚拟现实技术所激发的灵感。沉浸式视频技术是 20 世纪 90 年代以来兴起的一门新技术<sup>[1]</sup>,虚拟现实概念由美国人 Jaron Lanier 在 20 世纪 80 年代末正式提出来,而一些基础性的研究则开始于 60 年代<sup>[2]</sup>。国外从 20 世纪 90 年代开始,就组织人力、物力进行沉浸式视频的研究,十多年来,其研究成果已经覆盖沉浸式视频各个领域,包括沉浸式视频的捕获、编码、传输以及呈现等。其中德国、法国、美国、日本和韩国等对沉浸式视频的研究比较深入,比如欧洲几个国家从 1992 年开始联合开展的 DISTIMA 项目,采用 MPEG-2 标准作为基础,实现了一个较为完整的立体视频系统。

国内学术界对沉浸式视频的研究开始于 90 年代后期,应用研究尚处于起步阶段。由于沉浸式视频设备非常昂贵,国内多数研究被限制在理论探讨和利用国外软、硬件工具来开发系统的范围内。虽然和一些发达国家相比,我国的发展仍具有一定差距,但已引起政府有关部门和科学家们的高度重视,他们根据我国的国情,制定了开展沉浸式环境和 VR 技术的研究。相信在不久的将来,立体沉浸式技术在我国的发展将更加趋于完善,紧跟世界发展的步伐。

### 1.2 选题意义、目的与研究范围

在火灾、地震等重大灾难性事件后的救援任务中,人们常常会用到一些装有摄像设备的机器人率先进入灾后现场观察情况再派救援人员进入,以防不必要的人员伤害。但是目前这类监测机器人能够传输的还只是平面化的影像,其中所包含的信息远远不能达到人们的需求,二维的视频画面对三维世界描述的巨大局限性,使得普通的视频画面对复杂灾后环境无法最真实地还原与反馈,操作者也无法更加自由、方便和直接地控制机器人进行工作。

我们所提出的立体沉浸式替身机器人正是基于目前的监测机器人这个概念而改进形成的。立体沉浸式替身机器人可以实现远程沉浸式操控,它的沉浸式视频增加了场景的深度信息,增强了视觉的现实感和逼真感,可以给操控者提供全方位沉浸式的感受,沉浸式的操纵体验将能完全模拟人进入场地后的各种行动,使人身临其境地完成各类事故处理、救援、监测等任务,使机器人地工作更加安全、可靠且高效。

### 1.3 本课题应解决的主要问题

为了使沉浸式立体操控替身机器人具有使用的可实现性和舒适性,我们主要致力于解决沉浸式替身机器人的以下几方面问题:

(1) 为了满足沉浸式体验,立体画面是基础。若想在救援等紧急工程应用中使用,立体画面传输要做到延迟小、速度快、实时性好,使设备具有良好的 3D 视觉效果。

(2) 增强人机交互性。交互性是指用户与真实环境中的任务、事物发生的交互关系,主体与客体之间的交互是全方位的,要求对使用者姿态信息的采集和捕捉要灵敏且快速。

(3) 提高动作性能的优越性。动作性能是指用户能以客观世界的实际动作来操作系统，这更多的得益于体感交互技术的实现。动作性好的关键在于控制端较高的自由度和灵活度，能够与使用者的姿态动作保持一致和同步。

(4) 降低能耗。为避免机器人在远程操作过程中能量耗尽，要求沉浸式替身机器人能耗低。

## 2. 研究内容及方法

由概念示意图 1 可以看到，我们所设计的沉浸式立体操控替身机器人主要由三部分技术所构成：机械控制系统、姿态数据的获取和沉浸式环境的构建。由于本 PRP 项目主要负责穿戴设备对机械臂和双目摄像头的控制，小车的项目由另一组 PRP 同学完成，因此，本文主要介绍以上三方面技术的研究。在本课题中，我们采用多个 MG996R 舵机联合组成多个自由度的机械臂；用舵机代替云台搭建了简易的双目摄像头转动机械设备；用 MPU6050 陀螺仪芯片作为姿态传感器实时检测人的头部和手臂的姿态数据；用 stm32 单片机处理获得的数据，并控制舵机的转动；通过数学计算得出的数值信息组装集成好的摄像头。

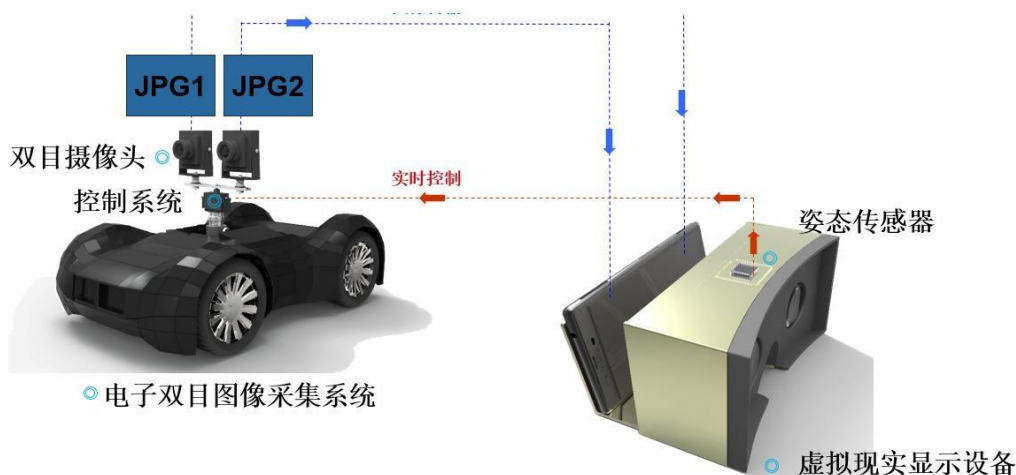


图 1 沉浸式立体操控替身机器人概念图

### 2.1 机械臂的组成和控制

由于是制作样机，我们并没有采用复杂的结构制作机械臂，而是运用了 MG996R 舵机的组合构成了简单的机械臂结构。MG996R 舵机是一种位置伺服的驱动器，适用于角度需要不断变化并可以保持的控制系统。其工作原理是：控制信号由接收机的通道进入信号调制芯片，获得直流偏置电压。它内部有一个基准电路，产生周期为 20ms，宽度为 1.5ms 的基准信号，将获得的直流偏置电压与电位器的电压比较，获得电压差输出。最后，电压差的正负输出到电机驱动芯片决定电机的正反转。当电机转速一定时，通过级联减速齿轮带动电位器旋转，使得电压差为 0V，电机停止转动<sup>[3]</sup>。

舵机的控制信号是利用占空比的变化改变舵机位置的 PWM 信号（如图 2 所示）。可以采用单片机作为舵机的控制单元，使 PWM 信号的脉冲宽度实现微秒级的变化，从而提高舵机的转角精度。单片机完成控制算法，再将计算结果转化为 PWM 信号输出到舵机。单片机系统是一个数字系统，其控制信号的变化完全依靠硬件计数，受外界干扰较小，整个系统工作可靠。

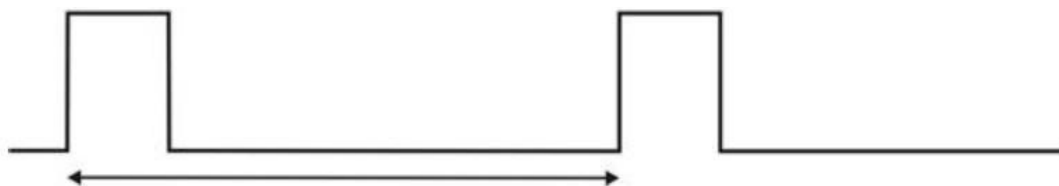


图 2 PWM 信号



在本课题中，我们使用了 5 个 MG996R 舵机和一些金属器件组装成了替身机器人的机械臂部分，其中 1 个舵机起加持作用，另外 4 个为机械臂提供了 4 个自由度，分别模拟了人体小臂的上下运动、手腕的上下运动、小臂的转动和手腕的转动。在本课题中，我们采用自己焊制的 stm32 单片机板作为微处理器。我们配置 TIM2 的 4 个 GPIO 口输出 PWM 信号，分别控制 4 个自由度上的 4 个舵机，我们查阅资料并自己调试，确定 4 个 GPIO 口分别为 PA2、PA3、PC6、PC7。之后，我们编写程序，使单片机根据采集到的姿态数据输出不同占空比的 PWM 信号，控制舵机以不同的速率转过不同的角度，从而达到控制机械臂的效果。

图 3 向我们展示了 Solidworks 中模拟的机械臂的示意图，我们小组的这个设计只需通过控制 5 个舵机的转动即可达到模拟人体手臂动作的效果。

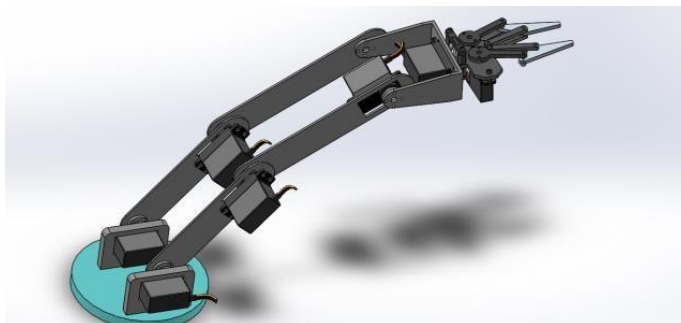


图 3 机械臂的示意图

## 2.2 双目摄像头的组成和控制

本课题中，双目摄像头是采用集成好的摄像头制作的，我们控制双目摄像头的转动来模拟人的头部的转动是通过控制它的搭载平台的转动来实现的。

对摄像机的控制通常是利用摄像机云台作为执行机构对摄像机进行水平和垂直的移动和控制。摄像机云台是一种安装在摄像机支撑物上的工作平台，用于摄像机与支撑物之间的连接，在云台水平、垂直运动的同时，它也携同摄像机做相同的运动，这样就可以通过控制云台的运动来控制摄像机的运动。目前国内的云台控制技术系统已经相当成熟，在云台上安装好摄像头后可调整摄像机水平和俯仰的角度，达到任意需要的角度的位置。

但是，由于本项目仍在样机阶段，我们仍采用更方便的 MG996R 舵机作为双目摄像机的搭载平台，使用舵机云台来模拟并实现摄像头云台水平移动的基本功能。舵机是一种伺服马达，其本身具有体积小、灵敏度高、可控性强等特点，效率较高从而便于实时控制，可以在微机电系统中作为基本的输出执行机构，其简单的控制和输出使得单片机系统非常容易与之接口。舵机接收单片机脉冲信号，转过相应角度，可以实现对摄像头位置的调整。我们在本课题中使用 2 个舵机构建双目摄像头云台，利用它们的转动来模拟人的头部的水平和俯仰转动，用很简单的机械结构就达到了理想的效果。

## 2.3 姿态数据采集与传输系统设计

本项目基于虚拟现实技术为用户构建了一个立体沉浸式的环境，而用户与系统的交互性及自由性是立体沉浸体验的核心。为使立体沉浸式操控替身机器人具备更好的人机交互性、自由性，我们在立体环境的基础上设计了姿态数据采集与传输系统来完成和实现人机交互的相关功能，进一步增强了沉浸式效果与体验。本系统主要由微处理器（MCU）、姿态传感器、电源模块等组成。主要实现对人体头部姿态的数据采集和数据传输的功能，其示意图如图 4 所示。

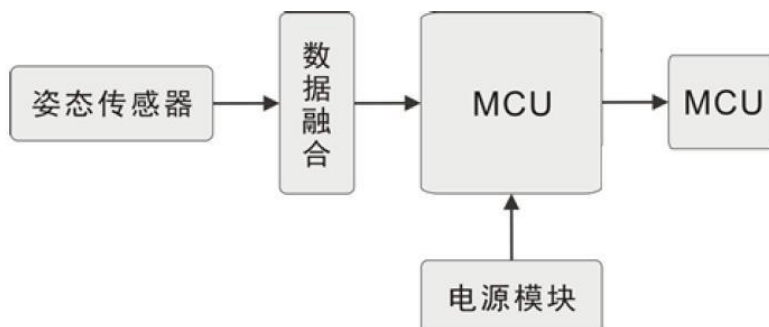


图 4 姿态数据采集与传输系统

### 2.3.1 姿态数据采集系统

本系统选择 MPU6050 陀螺仪模块作为姿态传感器来检测人体头部和手臂运动的姿态角度变化。MPU6050 芯片集成了三轴 MEMS 陀螺仪、三轴 MEMS 加速度计以及可扩展数字运动处理器 DMP (Digital Motion Processor)，MPU6050 的陀螺仪和加速度计均采用三个 16 位的模拟数字转换器，因此可以将测量的结果输出成数字量。我们在手臂的小臂和手腕上各戴上一个装有 MPU6050 陀螺仪的穿戴设备，即可获取手臂运动的姿态数据，人体头部运动的姿态数据的获得也可用相同的方法完成。

利用 MPU6050 模块采集得到的只是三轴加速度和三轴角速度的原始数据，由于目前 MEMS 陀螺仪本身的精度不高，致使其为主要构件的姿态测量精度也不理想。因此单一传感器难以得到相对真实的姿态角度，为获得姿态角度测量准确性较高且可靠的数据，必须对 MEMS 陀螺仪的随机误差进行补偿，解决噪声干扰问题，才能获取最优姿态角度，以获得沉浸式控制的最佳效果。正是由于这个原因，姿态传感器所要获取的人体头部和手臂运动的姿态角变化，需经过数据融合处理才能得到<sup>[4]</sup>。

目前对陀螺仪的姿态数据融合，应用最为广泛的是互补滤波和卡尔曼滤波算法。互补滤波算法虽然阶次越高融合效果越好，但迟滞性越加显著，并不适合于本系统的数据传输及对电子双目的实时控制。从实时性和融合效果综合角度来看，卡尔曼滤波是不错的选择，其收敛速度和滤波效果都平衡得很好。因此，本系统对由加速度计和陀螺仪建立的姿态角度测量系统，采用卡尔曼滤波方法，对来自加速度计和陀螺仪的信号进行融合。

卡尔曼滤波是以最小均方误差为估计的最佳准则，寻求一套递推估计的算法，采用信号与噪声的状态空间模型，利用前一时刻的估计值和现时刻的观测值来更新对状态变量的估计，求出现在时刻的估计值，它适合实时处理和计算机运算。其数据融合流程图如图 5 所示。

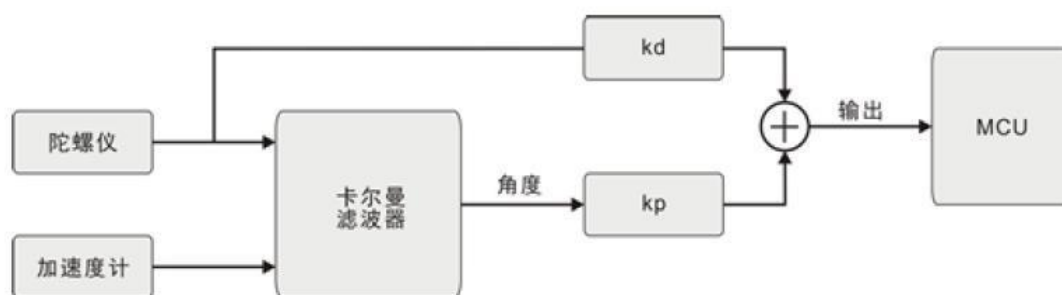


图 5 卡尔曼滤波算法下的数据融合流程图

经过试验证明，卡尔曼滤波方法可以有效提高陀螺仪精度，抑制漂移和噪声。根据以上分析和前期试验，本系统最终以 MPU6050 为核心传感器，采用卡尔曼滤波来降低测量噪声、提高精度，将算法与传感器集成。该集成芯片具有体积小、响应快、数据输出稳定准确等优点，能够非常及时、迅速地输出当前姿态信息，并有着相当高的精度。

### 2.3.2 姿态数据处理与传输系统

在利用陀螺仪采集到相应的姿态数据之后，需要用微处理器（MCU）处理相应的数据并传输给舵机以控制机械臂和双目摄像头的运动。在本系统中，我们采用具有低功耗、低成本以及更好兼容性等优点的 stm32 单片机，其主要负责数据的调试、控制电子双目和机械臂的转动以及完成姿态解算的相关运算。Stm32 单片机与 MPU6050 陀螺仪的串口通信连接方式如图 6 所示。

我们使用交叉线的方式连接 stm32 单片机和 MPU6050 陀螺仪，即把 stm32 的 PA10 引脚（复用功能为 USART1 的 Rx）接到陀螺仪的 Tx 接口，把 stm32 的 PA9 引脚（复用功能为 USART1 的 Tx）接到陀螺仪的 Rx 接口，之后再将两者的 VCC 和 GND 线相连，以实现 USART 串口通信。

为了完成沉浸式立体操控替身机器人的控制，除了获取和处理姿态信息之外，转角信息的传输也是至关重要的，因此，在本课题中，我们开发了无线信号的收发系统，将转角的采集系统与 3D 眼镜固定在一起，感知人头部的转动，同时将感知的信号实时以无线的方式发送，接受部分则与舵机、相机一起组成下位装置，受另一块单片机控制，实现相机转动及图像的采集。在这样的功能设定中，需要两片 stm32 单片机，一块处理转角的信号采集及发送，另一块完成信号的无线接收，并将信号用于控制舵机的转动，无线信号传输的原理如图 7 所示。

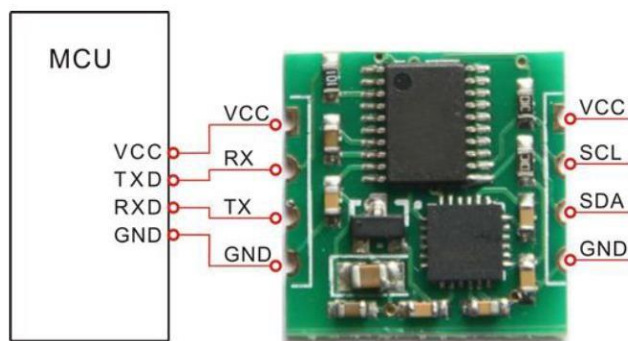


图 6 stm32 单片机和 MPU6050 陀螺仪串口通信

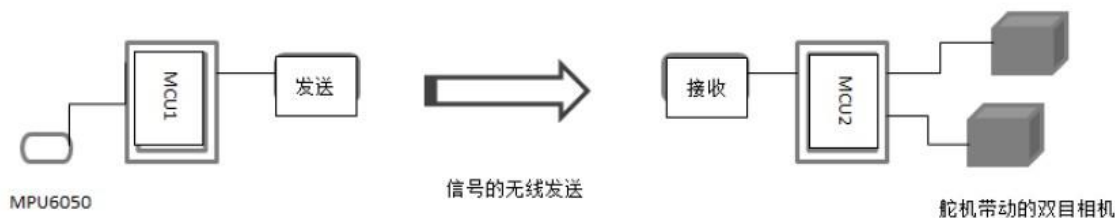


图 7 无线信号传输原理

如图 7，MCU1 完成转角的信号采集，并通过无线模块将信号发送，在另一部分中，相同设置的无线模块完成信号的接收，并将信号传输到 MCU2 中，stm32 单片机根据接收到转角信息，完成对舵机的控制，实现相机的转动即可以采集不同角度的图像信息。将采集到的图像信息传输到图像处理的上位机中，再通过相应的软件使图像通过虚拟现实设备显示。由此实现相机的视角跟随人头部的转动来调整，借此给人一种身临其境的沉浸式视觉体验。机械臂跟随人手臂的运动也可以用类似的原理完成。为实现转角数据的无线传输功能，本课题中使用了 nRF24L01 无线传输模块<sup>[5]</sup>。nRF24L01 芯片是挪威 Nordic 公司推出的一款单片 2.4GHz 无线收发一体的芯片，芯片内部设置有专门的稳压电路，因此，使用任何电源均有很好的通信效果，并且采用 SPI 通信协议，发射功率和工作频率等所有工作参数可全部通过软件设置。由于芯片的 QFN 封装形式无法直接与已有电路连接，我们采购已经完成外围电路连接的 nRF24L01 无线传输模块来实现相应的功能。

该模块有 8 个引脚，其中 CE：使能发射或接收，IRQ：中断，CSN、SCK、MOSI、MISO：SPI 引脚，通过此引脚配置 nRF24L01。nRF24L01 模块和 stm32 单片机连接的具体方法是，CE→PD2，CSN→PD5，SCK→PD3，MOSI→PD6，MISO→PD4，IRQ→PD7，由此，可以通过 GPIO 口，模拟实现 SPI 通信，完成无线传输模块的功能。

#### 2.4 立体沉浸式环境的构建

在本课题中，立体沉浸式环境由电子双目图像采集系统、头戴式虚拟现实显示设备、姿态传感器、控制系统等部分构成（如图 8 所示）。其中电子双目图像采集系统与虚拟现实设备共同构建立体环境，姿态传感器配合控制系统实现体感控制，本章节将主要介绍立体沉浸式环境的原理及构建。

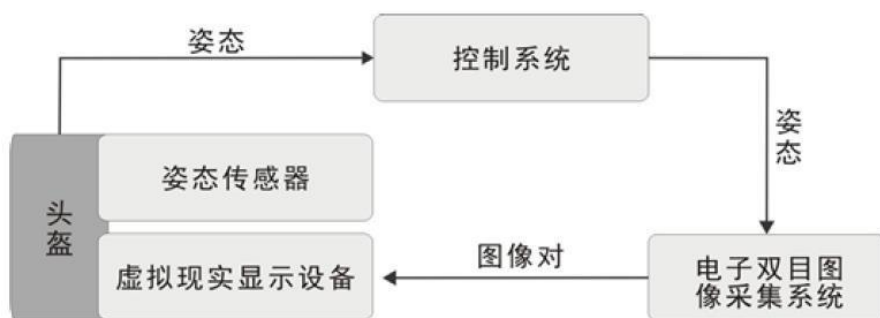


图 8 立体沉浸式环境原理图



由上图可知，立体沉浸式环境的构建主要依赖于双目摄像头的设置和 VR 头盔的构筑，因此在本节中，我们主要介绍这两方面的内容。

#### 2.4.1 双目立体成像系统

捕获场景的空间信息并形成立体图像是立体沉浸式环境构建的前提条件，现实生活是三维立体的，人们通常总是用双眼同时观看物体，由于两只眼睛存在视轴的间距(瞳距)，左眼和右眼在观看一定距离的物体时，所接收到的视觉图像是不同的。通过眼球的运动、调整，大脑综合了这两幅存在是视差的图像的信息，感知到生理深度暗示，从而产生立体感，这便是双目立体视觉的基本原理。要产生立体影像，单台摄像机无法完成，所以本系统获取立体影像的主要方式是由两台同时工作的摄像头，实时传输两幅具有视差的图像，反应空间场景、位置等信息。再通过头戴观测设备，使左右眼分别观测到两幅图像，人的大脑对这两幅图像进行处理后，根据两幅图像的差异判断出物体与双眼的距离等空间信息，即产生立体效果于人的大脑当中。

常用的双目立体视觉成像模型有平行双目成像模型和汇聚双目成像模型两种，两种模型都应用两个单目摄像头进行取景。所得的两幅有视差的图片在人大脑中叠加融合处理，就构成了有深度立体效果的画面。综合人眼获取图像的运作方式，汇聚双目成像模型更符合人眼的视觉习惯。为获得较好的立体成像效果，本系统选取了汇聚双目成像模型。

理论和实验表明，两个目标摄像机与三维模型的位置关系、两个目标摄像机之间的距离、会聚角变化值等，是影响立体效果的重要因素。为获得较好的沉浸式体验效果，需要讨论相关影响因素，找到两个摄像头的最佳距离和角度。

经过课题中的理论运算和实验辅助，我们获得了双目摄像头之间位置关系的最佳选择：两个目标摄像机之间的距离  $L$  为一般情况的瞳孔距 50mm 时摄像效果比较好；双摄像头的夹角  $\alpha=1.43305^\circ$  时观察的立体感最强；两摄像头在水平面下夹角为 25 度时观察者的舒适度最好。

#### 2.4.2 沉浸式显示设备

为了使系统便携性好，本系统使用近几年备受关注的基于手机的虚拟现实环境头戴设备作为沉浸式环境的显示设备。如图 9 所示，本系统所用头盔式显示设备是暴风魔镜基础上改造所得。暴风魔镜是款非常简单的 3D 眼镜，将手机安装于设备前方作为显示器，通过分屏软件及设备，使电子双目摄像头捕捉的两幅图像分别呈现于手机显示屏的左、右半屏，通过头戴设备观测，图像映入人的大脑后经过处理产生立体沉浸感。头戴设备上将安装陀螺仪姿态传感器芯片，监测人头部运动形态，便可以完成相应的人机交互工作，实现立体沉浸式体感控制。

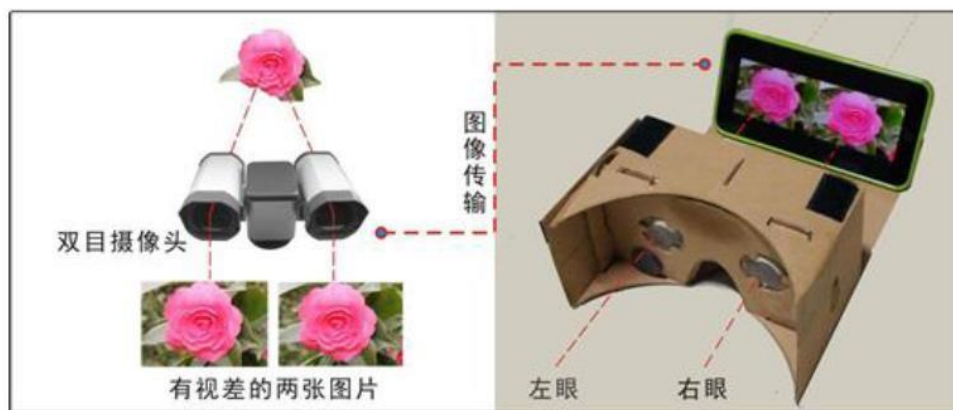


图 9 头盔式虚拟现实显示原理

### 3. 研究结果及讨论

在研究了头戴和手戴式体感控制系统之后，我们完成并组合了以上讨论的各部分机构和系统，制作了沉浸式立体操控替身机器人的样机（如图 10 所示）。



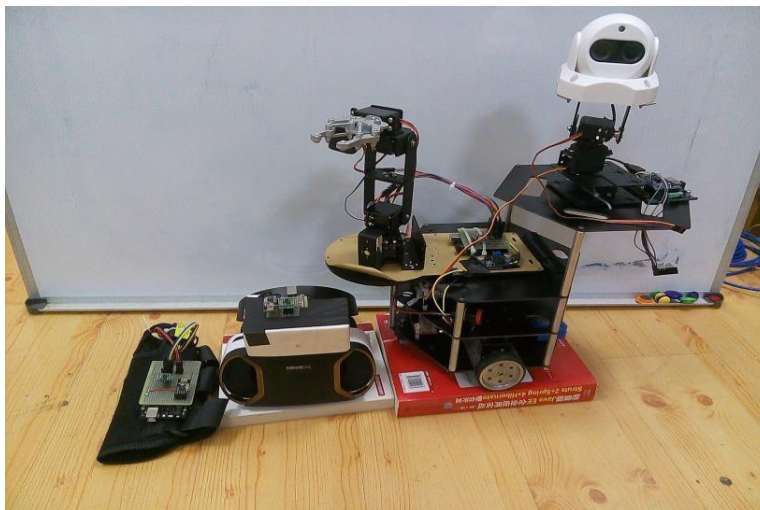


图 10 样机

我们对样机进行试验和调试，认为样机基本能够完成沉浸式的操作，达到了预期的目标，给人一种身临其境的感觉，让替身机器人能够代替人完成一些任务。我们之后又进行了一系列的操作与调试，发现了我们设备的一些优势，也有一些问题涌现了出来。



#### 4. 结论

我们成功完成了沉浸式立体操控替身机器人的样机制作，主要通过陀螺仪采集姿态数据——单片机处理数据——无线传输数据——舵机控制摄像头和机械臂的方式完成整套机器人的运行。我们的这套沉浸式机器人系统能够比现有的机器人带给人更加真实的感受和更加灵活方便的操作，但同时，我们也认识到了目前的不足，比如灵活度的问题：样机阶段的机械臂只有 4 个自由度，还不能真正实现手臂、手部动作完全跟随人体动作。在接下来的研究中，我们将继续完善以下几方面的内容：

(1) 增加作品关节动作精度。增加手部传感器（压力传感器手套），运用弯曲传感技术完全检测手部动作信息，并将动作信息化为控制信号；借助 3D 打印技术打印机械手臂，使手指部分多关节全面跟随人体手部动作，实现物体目标自然抓取。

(2) 提升作品用户体验。在目前样机实验阶段，系统对电子双目转动的控制在 180 度范围内，在实际应用中为扩展电子双目更大的视野可以将角度范围扩大，并且为使其控制更精确，可以将角度再进行细分。在今后的设计和研究中，我们将使用更多的姿态传感器来得到精确的定位信息和姿态数据，进一步提升沉浸式体验，将体感控制的动作更加具体化和细腻化，让替身机器人的每一个动作都能与使用者同步。

相信经过改进之后的沉浸环境下的立体操控替身机器人能够更好地实现人机互动，帮助人们精细、准确地完成一些不便由人来完成的工作，提高人们的使用舒适度和满意度，为残疾人士或是救援人员提供力所能及的帮助，促进人类社会的发展和前进。

## 参考文献

- [1] Carl Machover and Steve E. Tice. Virtual Reality. Computer Graphics and Applications. IEEE, 1994.
- [2] R. Chellappa, C. L. Wilson, and S. Sirohey. Human and machine recognition of faces: a survey. Proceedings of the IEEE, vol. 83, no. 5, pp. 705-741, 1995.
- [3] 时玮. 利用单片机 PWM 信号进行舵机控制[A]. 北京交通大学. 1-1.
- [4] 冯智勇, 曾瀚, 张力. 基于陀螺仪及加速度计信号融合的姿态角度测量[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2011, 36(4): 137-144.
- [5] nRF24L01 无线模块[OL]. [http://baike.baidu.com/link?url=5bdQFBib4K3NwMH\\_RwTWRNjmkS\\_COQBw63uxUHwPR3G0XzXSigeR9504yN96CUpP9vS6d\\_F-FYIyT8nmQRHeIK](http://baike.baidu.com/link?url=5bdQFBib4K3NwMH_RwTWRNjmkS_COQBw63uxUHwPR3G0XzXSigeR9504yN96CUpP9vS6d_F-FYIyT8nmQRHeIK)

## 谢辞

在本次 PRP 项目中，衷心感谢王坤东老师和高闻灿学长对我的悉心指导和教诲，让我受益匪浅，也很感谢同组同学的帮助和支持，正是大家一起的通力合作才让我们的 PRP 项目得以顺利完成！