

微型侦察机器人音视频传输系统设计与实现

赵忠辉, 谈英姿

(东南大学自动化学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 现场图像和语音信息的采集是侦察机器人的重要功能。本文研究微型侦察机器人的无线音视频传输系统。硬件方面以 i.MX283 处理器作为主控制器, 包括视频采集、音频采集解码和无线通信等功能模块; 软件方面以嵌入式 Linux 作为操作系统平台, 通过 V4L2、ALSA 接口采集音视频数据, 并根据 RTSP/RTP 协议搭建流媒体服务器。本文实现了机器人本体平台的音视频流畅稳定的传输, 为机器人远程操控提供可靠保障。

关键词: 侦察机器人; 嵌入式 Linux; V4L2; ALSA; RTSP

中图分类号: TP242 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2016)09-0048-06

Design of Audio and Video Transmission System for Micro Reconnaissance Robot

ZHAO Zhong-hui, TAN Ying-zi

(School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096 China)

Abstract: The important function of reconnaissance robot is to collect audio and video information in its worksite. This paper studies the wireless audio and video transmission system for micro reconnaissance robots. For hardware design, i.MX283 is used as the main controller, it is equipped with some functional modules such as video capture module, audio capture module, and wireless communication module. For software design, embedded Linux is used as the operating system platform. The audio and video data is captured through the V4L2 and ALSA interface, and a streaming media server is built based on RTSP/RTP protocol. This paper realizes a smooth and stable transmission system of audio and video on the platform of the micro reconnaissance robot, and provides reliable guarantee for robot's remote control.

Key words: reconnaissance robot; embedded Linux; V4L2; ALSA; RTSP

1 引言

狭窄区域的侦察和探测在军用和民用领域都有较大的应用需求, 是近年来机器人研究的热点之一^[1]。这些应用场合要求机器人具有体积小, 机动性强, 转向灵活等特点, 而且要能够实现遥控或远距离控制。由于侦察机器人常常工作在操作员视距之外的工作现场, 为使机器人完成必要的任务, 需要指挥人员对现场的地形、环境等因素进行全面的了解^[2], 音视频是其中最为重要的数据信息之一。通过在机器人端搭建无线音视频传输系统, 操控员可获得实时的音视频数据并对其进行分析、进而执行相应的操作。

国外对于微小型侦察机器人的研究开始较早, 美国明尼苏达大学主导的分布式机器人研究中心已经对此进行了较长时间的研究^[3-4], 美国 Recon Robotics 公司研发的可投掷微型侦察机器人^[5]已经获得美国军方大规模的采购。国内的部分高校也对该领域进行过一定的研究^[1,6-7]。微小型侦察机器人的音视频传输系统多采用模拟方式实现, 发送端通过无线图传模块将模拟音视频信号直接进行调制发送, 接收端则需配备相应的图传接收模块解调。模拟传输方案相对于数字传输方案技术更成熟、系统实现更简单, 但其在要求高清侦察、多机器人组网等场合有着较大的不足。无线数字音视频传输技术在微小型侦察机器人领域有着较大的应用前景。

本文针对一款微型侦察机器人, 设计其无线数字音

收稿日期: 2016-02-03

视频传输系统,实现对机器人工作现场音视频数据的采集与传输。系统的主要设计指标如表1所示。

表1 音视频传输系统设计指标

类型	参数	类型	参数
视频质量	720P	传输延时	<300ms
音频质量	清晰流畅	终端接入	>5个
传输距离	>30米(室内)	跌落稳定性	>3米跌落高度

2 系统总体方案

图1所示为微型侦察机器人控制系统总体结构图。控制系统采用主从控制方式。主控制器具有较强的数据处理能力,搭载嵌入式Linux操作系统,主要实现数据采集、无线通信等功能;从控制器为单片机系统,搭载实时操作系统,实现对实时性要求更高的机器人运动控制。

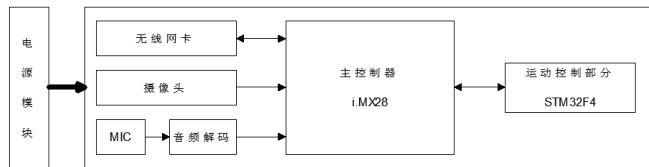


图1 微型侦察机器人控制系统总体结构图

本文所实现的音视频传输系统位于主控制器端,涉及到的功能模块包括主控制器、视频采集、音频采集解码以及无线通信模块。

(1) 主控制器模块

读取采集到的音视频数据,将其打包并通过无线网卡发送出去。主控制器除需要具有较强的数据处理能力外,还需提供必要的连接外部设备的接口。系统主控制器选用恩智浦公司的i.MX283处理器。i.MX283是一款低功耗、高性能处理器,采用ARM926EJ-S™核心,主频可达454MHz,其片上集成了大量功能单元,并提供了丰富的外部接口如USB2.0 OTG、10/100M以太网、CAN、串口、I2C等用于连接外部设备。

(2) 视频采集模块

通过摄像头实现对现场图像的采集。视频采集模块采用深圳锐尔威视公司生产的USB摄像头模块。该摄像头模块可直接输出H264压缩格式的视频数据,支持调节H264比特率、压缩比,最大分辨率可达720P,170度广角镜头。通过前端摄像头模块对视频数据的压缩处理,可以极大地减轻主控制器负担,并能有效的降低系统成本。

(3) 音频采集解码模块

由驻极体话筒实现对现场声音的声电信号转换,音频解码器将话筒输出的模拟音频信号转换为数字音频信号并交由主控制器进行处理。音频采集模块采用恩智浦公司的低功耗立体声编解码器SGTL5000,其内部集成了MIC输入偏置与增益调节,驻极体话筒可与芯片MIC IN接口直接连接,同时芯片通过I2S与I2C接口与主控制器连接,其中I2S接口用于传输数字音频数据,I2C接口用来对芯片进行配置。

(4) 无线通信模块

负责建立起机器人端与远程操控端的无线链路,实现数据的无线传输。综合本系统对传输带宽、传输距离、实现成本等方面的要求,选择WLAN作为机器人无线通信的方式。本系统选用雷凌RT3070 USB无线网卡作为无线通信模块,其工作在2.4GHz频段,支持802.11b/g/n,数据速率最高可达150Mbps,可配置为STA或AP工作模式。为满足系统对远距离传输及穿墙性能的要求,无线网卡模块增加了无线功率放大模块,最大发射功率可达27dBm,经实测可达到室内30m的传输范围。

3 系统软件设计

3.1 视频数据采集

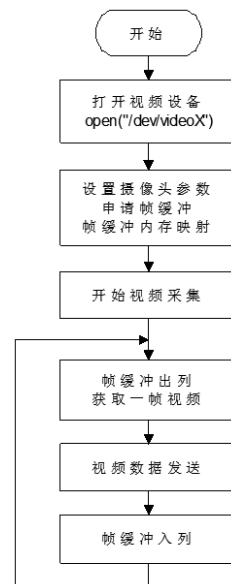


图2 调用V4L2采集视频数据流程图

V4L2(Video For Linux Two)是Linux系统中关于视频设备的内核驱动,是支持视频设备的一组标准API,包括一套数据结构和底层驱动接口规范^[8]。应用程序通过调用其API即可对摄像头设备进行操作,实现视

频数据的采集。

Linux 系统把外部设备被当作文件同一管理,可以像访问普通文件一样对其进行读写。当 USB 摄像头接入系统后,会生成设备文件 `/dev/videoX` (X 为编号),应用程序可通过 `open` 函数将其打开,并通过 `ioctl` 函数对摄像头参数进行设置。

V4L2 支持三种数据交换模式,分别是:直接读取设备文件方式、用户指针方式以及 `mmap` 映射方式^[9],这里采用的是 `mmap` 映射方式。该方式将驱动程序中的采集缓存区直接映射到用户空间,用户程序可直接处理而不必复制,同时驱动程序利用多个缓存区形成环形队列循环采集,提高了采集的效率。

图2所示为应用程序调用 V4L2 采集视频数据的流程。

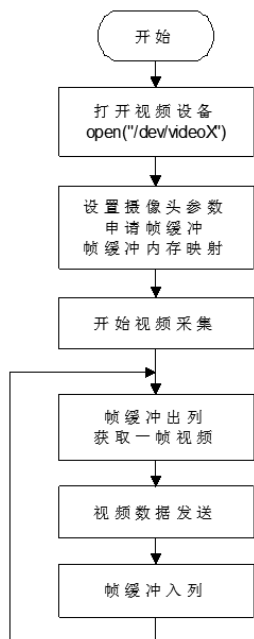


图2 调用 V4L2 采集视频数据流程图

3.2 音频数据采集与编码

ALSA 是目前 Linux 系统上运用比较成熟稳定的音频驱动架构,该架构提供相关的音频工具(如 `mixer`、`player`)来调节音频的各项参数,同时提供了相应的 API 库给用户进行应用开发,用户通过这些库的接口来对音频设备进行打开、播放等操作^[10]。

恩智浦为 i.MX28 系列处理器提供的开发包中已包含了对 SGTL5000 的支持,用户只需在内核配置时选择编译相关驱动即可,无需再额外编写或移植驱动程序。当 SGTL5000 接入时系统会自动识别并加载驱动程序,利用 ALSA 提供的混音器命令 `amixer` 可以对其进行配置,这里需要将 SGTL5000 设置成 MIC 输入。

用户程序通过调用 ALSA-lib 提供的 API 实现音频数据的采集。首先以音频获取模式打开音频设备;然后调用 ALSA 封装的相应函数设置音频参数,主要包括采样位数、采样率、通道数、缓冲区大小等,本系统中设置了采样位数为 16 位、单声道、采样率 8000HZ;参数设置完成后即可调用 `snd_pcm_readi` 函数循环读取音频数据。从音频设备中读到的是原始的音频量化数据,这里采用 G.711A 编码方式对其进行编码。

图3所示为音频数据采集编码的流程。

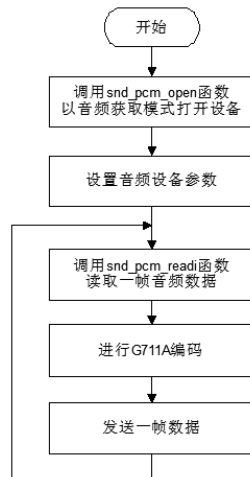


图3 音频数据采集编码流程图

3.3 流媒体服务器搭建

RTP 协议用来为 IP 网络的语音、图像、传真等多种需要实时传输的多媒体数据提供端到端的实时传输服务^[11]。RTP 协议建立在 UDP 协议之上,多媒体数据按照 RTP 协议的格式进行封包,然后通过 UDP 报文发送。

实现 RTP 协议的开源库有多种,本系统中使用 C 语言编写的 `oRTP` 库。用户需要为每一路音视频数据建立一个 RTP 会话,然后调用 API 函数即可实现对音视频数据的打包发送。

对 H264 视频数据,其一个 NALU 的长度可能超出网络的最大传输单元 MTU,这将会造成 IP 层对数据的分包。为避免这一情况,需要在 RTP 打包时就进行分包。考虑到 IP 包的最大数据长度为 1500 字节,这里设定一个 RTP 包有效数据长度最大为 1400 字节。参照 RFC 3984^[12] 文档,本系统中对 H264 数据的分包策略如下:

① 对长度小于 1400 字节的 NALU 单元,将其直接封装为一个 RTP 包;

② 对长度大于 1400 字节的 NALU 单元,按照 FU-A 方式将每 1400 字节数据封装为一个 RTP 包,最后一个 RTP 包需要将包头的 mark 位置 1。

对音频数据,其一帧数据较小,可以直接封装在一个 RTP 包中。

时间戳是 RTP 传输中的一个重要参数,是数据能以正确的时间顺序恢复的关键。视频数据的采样率设定为 90000Hz,时间戳值每秒增加 90000。本系统中视频帧率设置为 20fps,则每帧的 RTP 时间戳增量为 $90000/20=4500$,对于同一帧数据的各个分包应保持相同的时间戳值。音频数据的采样率为 8000Hz,本系统中为每 20ms 打包一次,每个 RTP 包包含 160 个采样数据,时间戳增量为 160。

RTSP 协议是用来对流媒体数据在网络上的传输提供控制服务的,同时也提供用于音频和视频的远程控制能力^[11]。RTSP 是一个应用层协议,主要实现流媒体的控制服务,具体的音视频流传输需要与 RTP 协议配合实现。在 RTSP 协议中,服务器和客户端之间的通信是通过消息应答机制来实现的^[12]。

本系统中 RTSP 服务器由 C 语言实现,设置了一个链表用于存储客户端的相关信息。RTSP 连接由客户端发起,服务器接收连接请求后将其加入客户端链表,准备接受 RTSP 请求。具体的 RTSP 交互过程如下:

① 客户端发出 OPTION 消息请求,服务器返回其所支持的所有方法。对于本系统实时传输音视频的需求,服务器只需实现 OPTION、DESCRIBE、SETUP、PLAY、TEARDOWN 方法即可。

② 客户端发出 DESCRIBE 消息请求,服务器返回 SDP 描述。SDP 是会话描述协议的缩写,用于描述流媒体体初始化参数的格式。本系统中 SDP 如下:

```
m=video 0 RTP/AVP 96
a=rtpmap:96 H264/90000
a=fmtp:96 packetization-mode=1;profile-level-id=4D401F;sprop-parameter-sets=Z01AH5ZUAoAtyA==,aO44gA==
a=control;trackID=0
m=audio 0 RTP/AVP 8
a=rtpmap:8 PCMA/8000
a=control;trackID=1
```

③ 客户端分别为音视频各发出一次 SETUP 消息请求,服务器根据客户端接收端口信息创建相应的 RTP 会话准备发送数据,并将会话相关信息返回给客户端。

④ 客户端发出 PLAY 消息请求,表示已准备好接收数据,服务器将该客户端对应的 RTP 会话加入到发

送队列,进行数据的发送。

⑤ 客户端发出 TEARDOWN 消息请求终止数据传输,服务器关闭音视频传输的 RTP 会话并将该客户端从链表中移除。

图 4 所示为本系统中 RTSP 交互的实现过程。

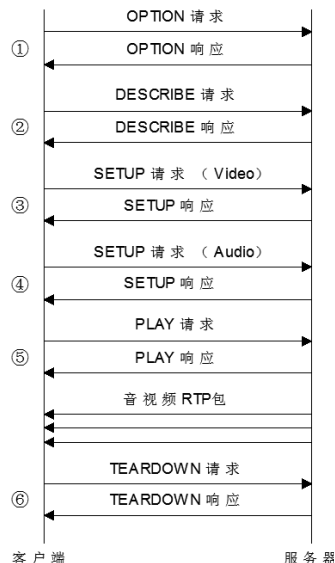


图 4 RTSP 交互过程

3.4 多线程方式实现

机器人音视频传输系统需要完成音视频数据采集、数据发送、RTSP 服务器等多个任务,为了保证系统能稳定运行,各个模块能可靠工作,采用多线程方式实现多任务并行运行。

Linux 系统下的多线程遵循 POSIX 线程接口,称为 pthread。该接口定义了创建和操纵线程的一套 API。本系统中通过该接口创建线程。

线程的最大特点是资源的共享性,但资源共享中的同步问题是多线程编程的难点。linux 下提供了多种方式来处理线程同步,例如互斥锁、信号量等。在本系统中,使用互斥锁对多线程共享资源上锁以保证资源同一时刻只被一个线程访问,使用信号量实现多线程任务间的同步。

根据各功能模块需要完成的任务,本系统共分为五个线程:RTSP 服务器线程、音/视频数据采集线程、音/视频数据发送线程。

RTSP 服务器线程接收 RTSP 客户端发起的 TCP 连接,响应客户端发出的 RTSP 请求。RTSP 服务器能与多个 RTSP 客户端并发通信,在这里采用 select 系统调用实现。Linux 系统提供 select 函数来实现多路复用输入/输出模型。将 TCP 监听 socket 和客户端通信 socket 的文件描述符加入 select 监控集中,当有客户端

发起连接或发出 RTSP 请求时 ,select 函数返回正值 ,程序即可判断可读的 socket 并进行后续操作。

音 / 视频采集线程与发送线程间通过共享缓存区实现数据交换。当采集完一帧音频或视频数据时 ,采集线程将数据存放到共享缓存区 ,并通过信号量通知发送线程 ;发送线程接到通知后从共享缓存区中读取数据 ,将数据打包成 RTP 包后依次向各客户端发送。为避免采集线程与发送线程同时访问缓存区造成数据错误 ,应使用互斥锁对缓存区进行上锁操作。当线程需要读写缓存区时对其上锁 ,读写完成后解锁 ;若缓存区已被占用 ,则该线程就会阻塞 ,直到其他线程对缓存区进行解锁。

4 系统实现

图 5 所示为本系统的机器人平台 ,这是一个哑铃状的微小型侦察机器人 ,可在狭小范围内执行侦察任务 ,同时其具有可投掷性 ,能够通过抛投的方式到达指定区域作业。



图 5 可投掷微型侦察机器人

机器人可通过自身配备的无线网卡搭建无线局域网。Linux 系统中加载无线网卡的 Soft-AP 模式驱动 ,机器人生成名为 MicroRobot 的无线接入点 ,操控设备通过连接该接入点可访问机器人。



图 6 机器人音视频播放效果

由于机器人的流媒体服务器按照标准的 RTSP / RTP 协议搭建 ,因此大部分支持该协议的播放器均能播放音视频。机器人的 IP 地址为 192.168.0.1 ,RTSP 服务器的端口号为 9999 ,在播放器中输入 URL :“rtsp://192.168.0.1:9999/live/”即可打开音视频流。图 6 所示分别为使用 PC 端的 VLC 播放器及手机

Android 端的操控 APP 进行音视频播放。

实测音视频播放的延迟一般在 300ms 以内 ,基本满足机器人操控对音视频实时性的要求。在五台设备 (3 台 PC ,2 部手机) 接入的情况下 ,音视频仍能保证流畅稳定的传输 ,达到了对支持多个操控设备接入的要求。

音视频传输距离通过统计 RTP 丢包率与实际播放质量进行测试。RTP 数据包通过 Wireshark 抓包软件捕获 ,音视频通过 VLC 播放器进行播放 ,其测试结果如表 2 所示。

表 2 音视频传输距离测试

测试距离(室内)	RTP 丢包率	实际播放质量
10m	0.3%	非常流畅
20m	3.8%	流畅
30m	12.9%	稍有卡顿
40m	36.7%	严重卡顿

经测试得机器人在室内 30m 范围内可获得较为流畅的音视频播放质量 ,当距离大于 30m 时 RTP 丢包率较高 ,音视频卡顿严重 ,此时可以通过对音视频质量进行调整以缓解卡顿情况。

针对跌落稳定性测试 ,本文分别设置了从楼梯滚落与 4 米垂直跌落的实验 ,如图 7 所示。经测试 ,机器人跌落后系统仍然正常工作 ,满足了对跌落稳定性的要求。

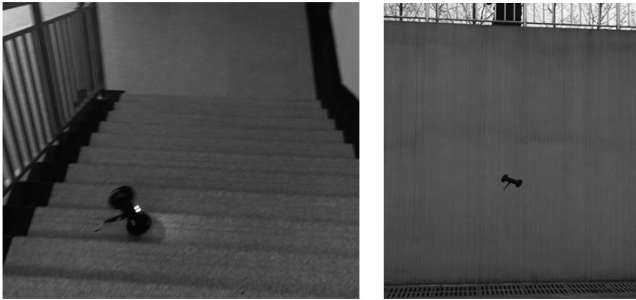


图 7 机器人跌落测试

5 结束语

本文针对一款哑铃状可投掷微型侦察机器人 ,设计了其音视频传输子系统。文中分别从硬件和软件两个方面对系统进行设计 ,实现了音视频数据的采集与传输、流媒体服务器搭建。在机器人本体上的实验结果表明 ,本系统能够实现音视频的流畅稳定传输 ,支持多操控端的接入 ,为机器人远程操控提供了重要的参考数据。随着 4G 技术的发展 ,机器人通过 4G 网络实现远距离操

(下转第 56 页)

5 结束语

电力载波通讯以其低成本无需架设单独线缆等优势得到了广泛应用。基于 KQ-130 模块的电力载波通讯系统,与传统电力载波系统相比,加入自定义通讯模式,大幅度提高了通讯的可靠性降低了电力线上的高频干扰,可应用电力抄表等系统中,有很大的实际应用价值。对电力载波通讯系统的研究也有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 秦国屏. 电力载波通信原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998. 2-3.
- [2] 何立民. 单片机应用系统设计 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994. 4-6.
- [3] 徐爱钧, 彭秀华. 单片机高级语言 C51 应用程序设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1998. 76-80.

(上接第 52 页)

控已成为一个重要的发展趋势。下一步可以考虑在机器人中添加 4G 模块, 实现 4G/WiFi 网络的切换传输, 以满足不同情况下对网络环境的要求。

参考文献:

- [1] 郑嫦娥, 黄强, 黄远灿等. 微小型自主侦察机器人设计 [J]. 科技导报, 2007, 25(21): 23-26.
- [2] 王贺燕, 侍才洪, 杨康建, 等. 基于救援机器人的远程无线图像传输技术 [J]. 医疗卫生装备, 2013, 34(3): 88-91.
- [3] YESIN K, NELSON B J, PAPANIKOLOPOU LOS N P, et al. Active video system for a miniature reconnaissance robot [C] // Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2000: 3919-3924.
- [4] WALTER M, ANDERSON M, BURT I, et al. The Design and Evolution of the eROSI Robot [C] // IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 2007: 2984-2989.
- [5] ANONYMOUS. Recon Robotics Introduces the THROWBOT XT Reconnaissance Robot [J]. Military Technology, 2012, 36(9): 227-249.
- [6] 陈卫. 微型便携式侦察机器人设计与实现 [D]. 南京航空航天大学, 2009.
- [7] 杨维, 殷希梅, 张运兵等. 一种微小型单兵侦察球系统的设计 [J]. 电子设计工程, 2013, 21(19): 86-89.
- [8] 刘学谦. 基于 DM3730 平台的智能数字音视频监控系统设计 [D]. 天津大学, 2014.

[4] 张毅刚. 新编 MCS51 单片机应用设计 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2012: 56-64.

[5] 王文中, 郭楠, 葛庆平. PC 机与单片机串口通信模型的设计与实现 [J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2004, (s1): 2-4.

[6] 王思彤, 袁瑞铭, 孙志杰. 低压电力载波技术及其在抄表系统中的应用 [J]. 电测与仪表, 2008, (3): 31-34.

[7] 张智勇, 周国正. 电力线载波通信数字化进程级标准 [J]. 电力系统通信, 2001, (5): 5-11.

[8] 黄健, 王富东等. 基于单片机的红外通讯系统设计 [J]. 自动化技术与应用, 2014, 33(5): 98-101.

作者简介: 陈曦 (1991-), 男, 研究生, 研究方向: 控制工程。

[9] 洪毅虹, 曹茜. Linux 下视频监控系统的研究与设计 [J]. 电脑编程技巧与维护, 2010(18): 40-41.

[10] 张明俊, 魏瑾. 嵌入式 ALSA 音频框架介绍与应用 [J]. 电脑开发与应用, 2013(9): 63-64.

[11] 褚典, 江春华, 郝宗波等. 基于 SIP、RTP/RTCP 和 RTSP 协议的视频监控系统 [J]. 计算机与现代化, 2013(11): 139-142.

[12] S. WENGER, M. M. HANNUKSELA, et al. "RFC3984-RTP Payload Format for H.264 Video" USC/Information Sciences Institute [s], Feb. 2005.

作者简介: 赵忠辉 (1992-), 男, 硕士, 研究方向: 机器人控制。