

文章编号: 1002-0446(2010)-01-0125-07

远程半自主机器人监控系统的设计及实验

许宏, 张怡, 陈锡爱, 王斌锐, 吕军

(中国计量学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 主要介绍了危险环境半自主机器人的远程监视和控制系统, 采用无线局域网和 CDMA 移动通信网络相结合的方式实现了视频图像数据的传输和远程控制操作. 详细介绍了 DM642 如何对视频数据进行采集、格式转换和压缩等操作, 以及机器人运动控制结构、机器人控制协议和无线传输协议的设计. 最后, 就无线图像传输和机器人无线控制的实验结果进行了分析和讨论.

关键词: 远程机器人; 监控系统; CDMA; DM642

中图分类号: TP242.6

文献标识码: B

Design and Experiment of Remote Semi-autonomous Robot Monitoring System

XU Hong, ZHANG Yi, CHEN Xi'ai, WANG Binru, LÜ Jun

(China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The remote monitoring and control systems of semi-autonomous robots applied to hazardous environments are introduced. Video image transmission and remote control are realized via the combination of wireless local area network (WLAN) and CDMA mobile communication network. The acquisition, format conversion and compression of video data by DM642, and the design of the robot motion control structure, robot control protocol and wireless transmission protocol are described in detail. Finally, experiments on wireless image transmission and wireless control are analyzed and discussed.

Keywords: remote robot; monitoring system; CDMA; DM642

1 引言 (Introduction)

移动机器人的远程监控技术能在远离现场的情况下传输被探测环境中的视频、音频和现场传感数据, 完成指令的接收和发送, 在危险作业等应用领域中扮演着重要的角色. 此类机器人具有空间不固定性, 且现场环境复杂, 因此远程机器人终端系统与控制中心端系统之间要采用无线通信方式.

在现有的无线通信技术中, 无线以太网在实际应用中虽然受到无线信号传输距离和穿透能力的限制, 其网络覆盖范围较小, 但是具备较大的带宽, 可传输质量较高的视频图像信息, 因而被广泛地应用于移动机器人的监控之中. CDMA 无线公共通信网络虽然传输带宽比较低, 但是其基站遍布世界各地, 网络覆盖范围非常大, 而且可以连接到因特网, 通信方便.

目前, 国内的机器人无线数据传输和控制方式大多采用无线局域网或无线电台的控制方式^[1-6], 前者受通讯距离的限制, 而后者受频带带宽、发射功

率和频段管理的限制. 另外, 在无线广域网通信方面, 中国科学院沈阳自动化研究所的乔卓等曾采用 GPRS 无线网络研究了机器人的无线控制^[7], 而将宽频、远距离和公网的 CDMA 移动通信网络应用于机器人无线通讯的研究还未有报道, 因而具有重要的研究意义.

本文研究的半自主机器人主要针对危险化学品事故现场的在线检测, 用于复杂多变的实时环境, 特别是有毒、爆炸敏感、需要在线检测、实时反馈信息的可探测区域和现场. 因而, 机器人需要完成实时现场图像传输、气体在线检测和有关样品检测、危险区域环境探测等复杂任务, 实时接收控制台的遥控指令, 同时发送机器人本体的位姿信息、运行轨迹, 因而对通讯性能有很高的要求. 本方案设计的机器人无线监控系统综合了无线局域网和 CDMA 网络, 当机器人靠近信息中心时, 启动无线局域网工作, 通过无线图像传输模块来传输视频流, 通过无线数据传输电台来传输控制指令和反馈数据; 当

机器人远离控制中心端系统时,利用 DSP 对采集的视频数据进行格式转换和压缩,并通过 CDMA 无线移动通讯网络实现图像的传输和命令的传送,这样能确保机器人工作在无线通讯网络覆盖区域的任意位置.

2 机器人视频采集和通讯系统结构(Composition of video capture and communication system for the robot)

该移动机器人采用 DM642 对视频图像进行采集,而后将其压缩为 JPEG2000 格式,最后根据实际通讯距离,选择 CDMA 或无线局域网方式与控制终端 PC 进行通讯.机器人视频采集和通讯系统体

系结构如图 1 所示.其中,模拟摄像头视频信号经 TVP5150 采集后,首先由 DM642 进行压缩,而后通过串行口(UART)连接 CDMA 模块后在无线广域网内与 PC 控制端进行数据传输或者通过以太网接口(EMAC)连接无线路由器后在无线局域网内与 PC 控制端进行数据传输.

3 远程机器人终端系统的实现(Implementation of remote robot terminal system)

因为无线局域网的带宽比较高,视频传输相对易于实现而且图像清晰流畅,已经广泛地应用于移动机器人中,所以本文不作介绍,而主要研究基于 CDMA 移动通信网的图像传输.

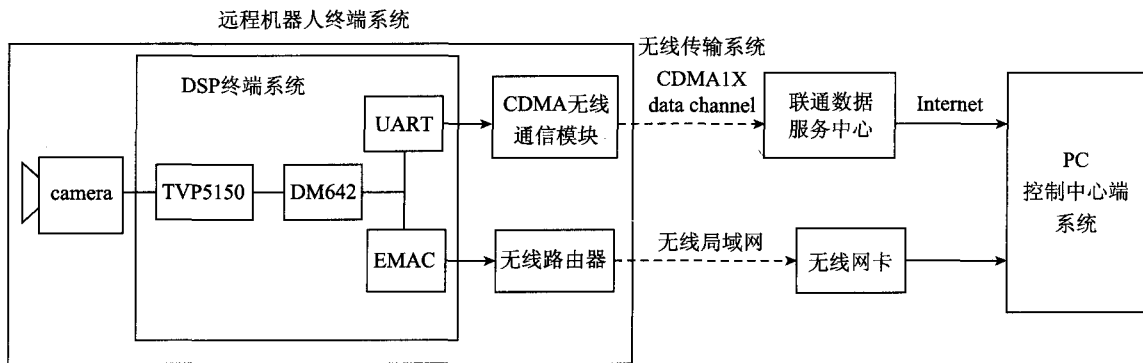


图 1 机器人视频采集和通讯系统结构

Fig.1 Composition of video capture and communication system of robot

3.1 视频采集

视频口 VP 作为 DM642 的内部外设,无法自行启动数据传送工作,也不能调节数据传输量.用户可以编程设置一个 FIFO 阈值,阈值在用户可编程的 DMA 参数表里设定. FIFO 内部数据量达到此阈值时,产生 DMA 事件,开始采集. PAL 格式视频数据经解码芯片 TVP5150 可以得到 YUV 4:2:2 的 8 位 BT.656 格式的数字视频数据流视频数据.解码后的亮度和色度信号相应地存放在 FIFO 缓存器中,被进一步划分成的 Y、Cb 和 Cr.

3.2 视频压缩在 DSP 中的软件实现

TI 公司的 DSP 开发软件包括以下内容:集成开发环境(CCS)、实时操作系统(DSP/BIOS)、第三方算法库标准(eXpmssDSP). DSP/BIOS 是一个用户可裁剪的实时操作系统,包含内存管理、线程管理、中断、外设管理和任务调度等功能^[8].

本程序是基于 TI 的参考框架 Reference Framework 5 (RF5) 编写的. RF5 主要实现 3 个功能: 存储管理、线程模型和通道封装. 它包含的主要数据处理元素有: 线程(thread)、通道(channel)、核(icell).

RF5 使用同步通信模块(SCOM)对象来实现线程的通讯,使用内埋单元通信(ICC)来管理核之间以及核与其线程之间的数据通讯.

处在最顶层的是线程,线程总是顺序地执行所包含的通道,线程在一个比较高级的级别上把数据组织在一起,它们可以与别的线程、设备驱动以及别的类似结构进行通讯.每个线程都在不断地等待消息,处理数据,并将结果发送给其他的线程,同时有可能还要发送同步消息给其他线程以实现线程间的通讯,这里使用的机制是 SCOM 模块.程序流程图见图 2.

图像压缩通过在 DSP 上移植 JPEG 编码器来实现.

JPEG 编码时使用的是正 DCT (FDCT):

$$F(u, v) = \frac{1}{4} C(u) C(v) \left(\sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 f(i, j) \cdot \cos \frac{(2i+1)u\pi}{16} \cos \frac{(2j+1)v\pi}{16} \right) \quad (1)$$

当 $u, v = 0$ 时: $C(u), C(v) = 1/\sqrt{2}$; 其它: $C(u), C(v) = 1$.

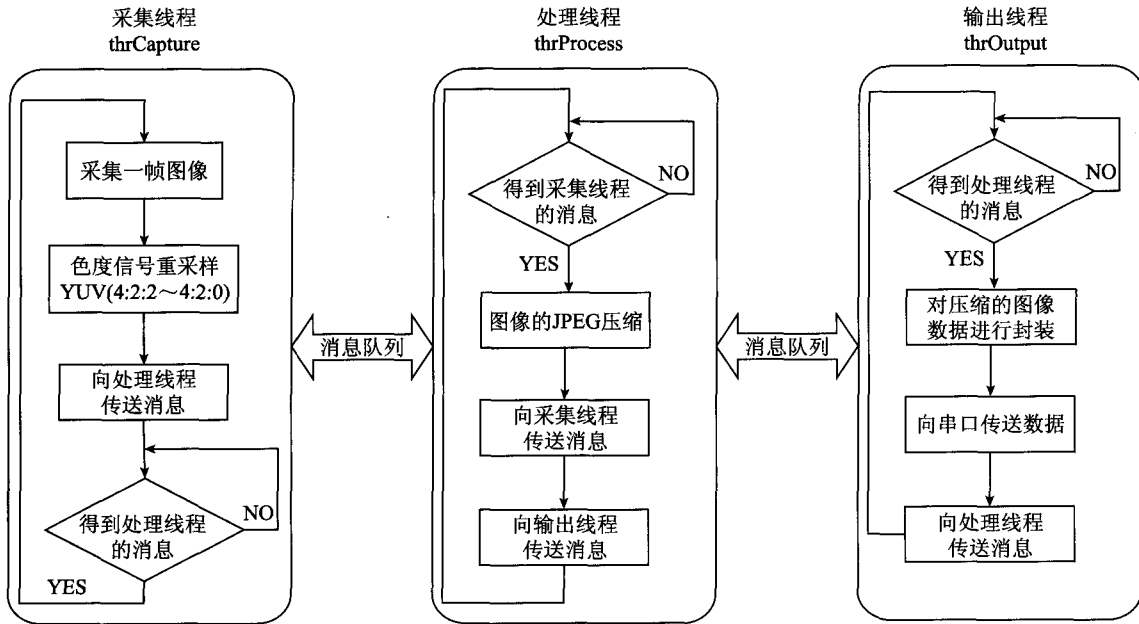


图 2 机器人视频采集压缩流程图

Fig.2 Flow chart of robot video capture and compression

解码时使用的是逆 DCT (IDCT):

$$f(i, j) = \frac{1}{4} \left(\sum_{u=0}^7 \sum_{v=0}^7 C(u)C(v)F(u, v) \cdot \cos \frac{(2i+1)u\pi}{16} \cos \frac{(2j+1)v\pi}{16} \right) \quad (2)$$

当 $u, v = 0$ 时: $C(u), C(v) = 1/\sqrt{2}$; 其它: $C(u), C(v) = 1$.

经过正变换后所得到的结果就为 DCT 系数, 其中 $F(0,0)$ 为直流系数 DC, 即一块图像样本的平均值, 它包含了原始 8×8 图像中的很多能量, 而其它的为交流系数 AC.

$$DC = \frac{1}{4} C(0)C(0) \left(\sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 f(i, j) \cdot \cos \frac{(2i+1) \times 0\pi}{16} \cos \frac{(2j+1) \times 0\pi}{16} \right) = \frac{1}{8} \sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 f(i, j) \quad (3)$$

为了实现数据压缩的目的, 对 DCT 系数 $F(u, v)$ 作量化处理, 在一定的主观图像保真度质量前提下, 丢掉那些对视觉影响不大的信息, 以获得较高的压缩比.

在 JPEG 算法中采用均匀量化器, 量化定义为: 对 64 个 DCT 变化系数 $F(u, v)$, 除以量化步长, 四舍五入取整, 则有:

$$Fq(u, v) = \text{round} \left(\frac{F(u, v)}{Q(u, v)} \right) \quad (4)$$

式中, $Fq(u, v)$ 为逆量化输出, $Q(u, v)$ 是量化器步长.

量化器步长是量化表的元素, 量化表元素随 DCT 变换系数的位置而改变. 通过量化降低了 DCT 输出矩阵的系数精度, 减小了数据量.

4 无线传输系统实现 (Implementation of the wireless transmission system)

无线局域网内, 采用高性能无线路由器实现对机器人近距离的无线控制; 公共无线通讯网内, 采用 CDMA 模块实现对机器人的远程控制.

4.1 基本控制协议规范

(1) 移动机器人内部控制系统基于 485 总线, 系统配置中只有一个主控制器, 即机器人内部决策控制端, 其它设备全以从机的形式挂在 485 总线上.

(2) 机器人远程控制器与机器人之间采用严格的“一问一答”式的通讯机制, 如果有数据反馈就反馈应返回的数据, 若无数据反馈, 就返回“原命令, 但无数据”.

(3) 错误处理. 协议帧的完整性通过 3 个机制来保证: 字头检查、帧长度检查、帧校验和检查. 如果机器人应答超时, 上位机重发, 如再次超时则置“通讯超时”状态字, 同时放弃此指令. 如果机器人返回数据错误 (校验和错误、指令错误等), 主机应重发 3 次. 如仍然错误, 则置“通讯错误”状态字, 同时放弃此指令. 具体命令帧格式见表 1, 其中: 字头固定 (0x55AA), 表示协议帧的开始; 地址 = 0X01 ~ 0X0F, 主机默认地址为 0, 其它设备的地址为 1 ~ 255, 系统中从机设备最大容量为 255; 状态字占据字节的高 2 位, 低 6 位是控制数据长度.

表1 机器人控制协议的命令帧格式

Tab.1 Command frame format of the robot control protocol

字头	地址	状态字/控制数据长度	命令字	控制数据	校验和
2 byte	1 byte	1 byte	1 byte		1 byte

表2 机器人图像传输协议的数据帧格式

Tab.2 Data frame format of the robot image transmission protocol

字头	类型码	图像数据包 ID	图像数据包大小	图像数据	校验和
1 byte	1 byte	2 byte	2 byte		1 byte

机器人的控制功能包括：机器人的行进速度，机器人的运动方向（前进、后退、左转、右转和停止），以及红外、超声、电子罗盘等传感器的开关控制和检测参数。

4.2 图像的无线传输协议

CDMA 数据传输模块采用标准的 AT 指令控制。由于我们采取串口中断接收数据的模式，而且开辟了串口接收缓存，因此可以通过判断关键字来解析命令。CDMA 模块通过 AT 指令设置远端服务器的 IP 和 Port。按照一定的步骤可以建立位于 Internet 中的服务器之间的网络连接。在网络层，针对不同的数据对象采用不同的网络传输协议：对于命令数据采用定长格式的字节数组表示，以 TCP 协议进行传输，以尽可能地保证命令数据的可靠性（具体内容在控制协议规范中介绍）；图像数据则采用变长格式的字节数组表示，以 UDP 协议进行传输，以满足图像传输的实时性。与 TCP 不同，UDP 并不提供对 IP 协议的可靠机制、流控制以及错误恢复功能等。但由于 UDP 比较简单，UDP 头包含很少的字节，比 TCP 负载消耗少，因此适用于一些允许丢包、出错或拥塞的场合。具体数据帧格式见表 2，其中：字头是固定不变的识别码；类型码是为了便于识别此数据包，是图像数据而不是命令交互数据；考虑到 UDP 协议无法保证数据的可靠性，采用图像数据包 ID 来索引一帧图像。

5 控制中心端系统的软件设计 (Software design of the control center terminal)

本地控制中心端系统的软件的主要功能包括：控制机器人的运动、接收图像和仪器仪表数据并存放在 PC 机上。本地端使用 Windows 操作系统，开发工具使用 VC++。

5.1 机器人运动控制软件实现

运动控制端通过行为层、协议解析层和硬件通讯层来实现对机器人的控制。行为层主要采用基于行为的方法，根据当前的任务状态，并综合感知模块检测到的环境信息、通过通讯获得的相关信息及

来自上层的有关命令，结合对工作环境的了解进行决策，为机器人规划出具体的运动方向和运动速度，实现具体的运动控制。

指令协议解析层是机器人控制架构的核心，指令协议对象将进行机器人实体控制指令的编制以及对下位机返回的传感器数据和机器人状态数据的解析转换。

硬件通讯层由直接与硬件设备通讯的对象组成，本系统中包括一个与机器人主体进行数据交流的串口通讯对象。

机器人的运动控制体系结构如图 3 所示。

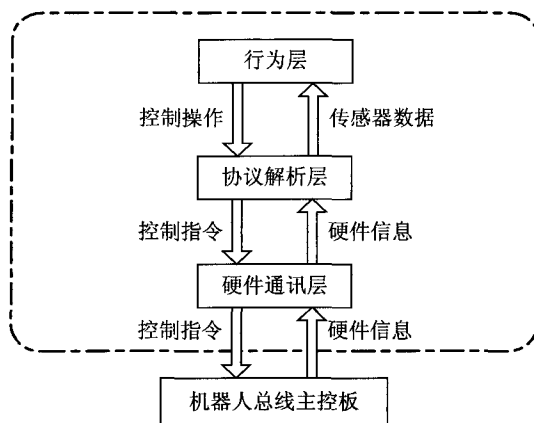


图3 移动机器人运动控制体系结构图

Fig.3 Structure of mobile robot motion control system

5.2 图像通信软件实现

本地服务器如果没连接到因特网可以通过串口从 CDMA 模块中读取图像数据并进行解码和存储；如果连接到因特网即可通过监听 CDMA 的 IP 地址信息和端口号，存放在文件中，当需要查看数据时，就打开文件，取出 IP 地址，主动和其建立连接、发送命令，命令的发送也是通过套接字 (Socket) 通信。程序流程如图 4 所示。

6 实验研究 (Experimental research)

通过实验研究验证了系统实现远程机器人视频图像无线传输的可行性。实验系统由 DSP 终端系是

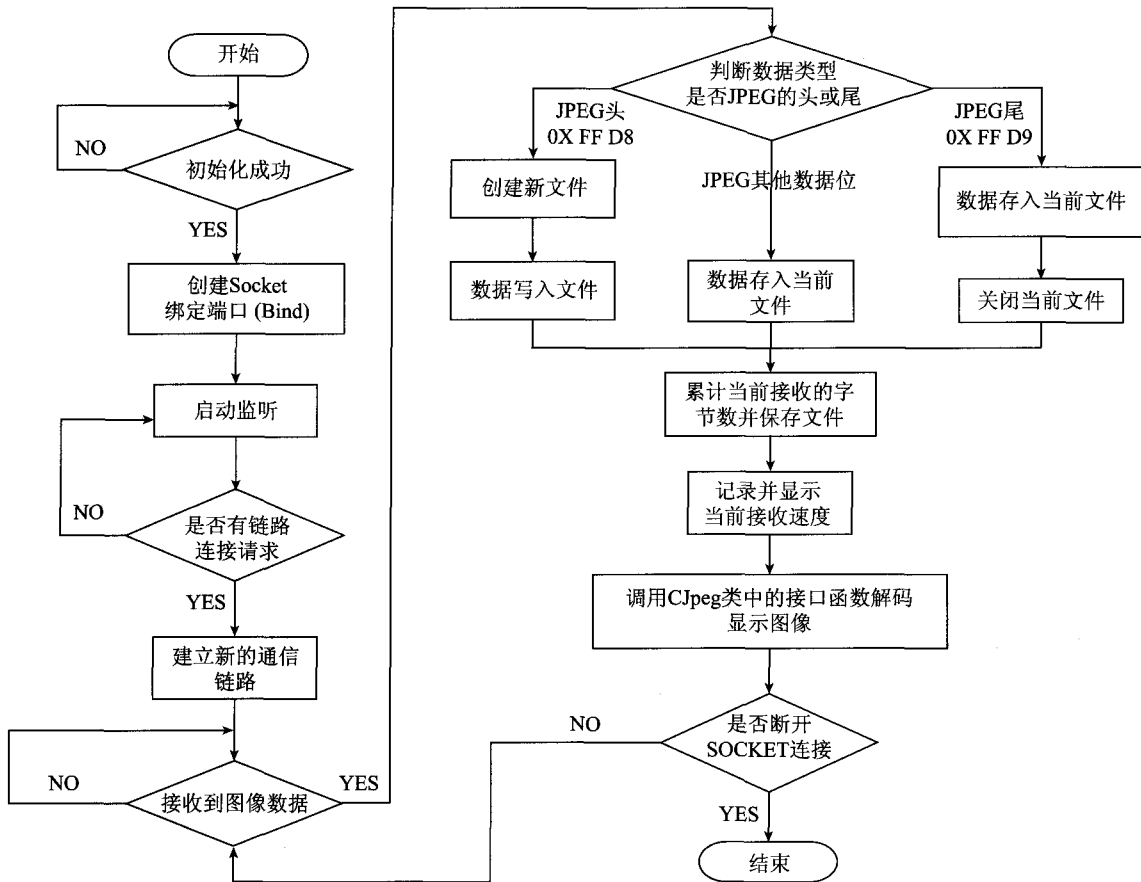


图 4 控制中心端的图像数据接收流程图

Fig.4 Flow chart of image data reception of control center terminal

统、无线传输系统和中心端系统三部分组成的(见图 1)。实验系统的摄像头为索尼 EVI-D100P (PAL), 无线局域网的架构基于华为公司的 Aolynk WBR204g 无线路由器和阿尔法公司的 GP50 无线网卡 (PCI 接口), 其中无线路由器连接终端的以太网口, 无线网卡连接 PC 中心端。CDMA 无线网络的架构是基于杭州爱赛德公司的 A60E 无线通讯模块, 可以实现 CDMA1X 无线网络和因特网的通讯链路的连接。中心端系统由具有因特网连接和无线网卡连接的 PC 机实现视频图像数据的本地接收、存储和显示。

6.1 基于无线局域网的实验

机器人在实验室周围自主移动时, 中心端系统可以收到 CIF 格式 (352×288) 的稳定视频图像, 约 5 frame/s, 图 5 是机器人在实验室周围运动时接收到的视频图像。

图 6(a) 是机器人运动范围扩展到室外校园环境中的情况。由于建筑物阻隔等影响, 信号衰减严重, 接收到的视频图像开始变得模糊, 并有丢帧现象出现。图 6(b) 是机器人在校园中离中心端 100m 左右时接收的图像。当机器人的运动范围进一步扩大时, 如果不借助无线网桥等中继设备, 中心端将难以接

收到图像数据。

6.2 基于 CDMA 无线网络的实验

考虑到远程机器人复杂多变的工作环境和空间位置上的不固定性, 对远距离的图像传输采用基于 CDMA 无线网络的架构是本实验的重点。

首先, PC 控制中心端需要连接到因特网上 (内网要开通外网端口绑定, 或者采用拨号上网) 并且开启监听, 利用 AT 指令通过 CDMA 无线通讯模块建立 CDMA1X 无线网络与因特网的通讯链路, 并且 CDMA 模块设定为透明传输模式。

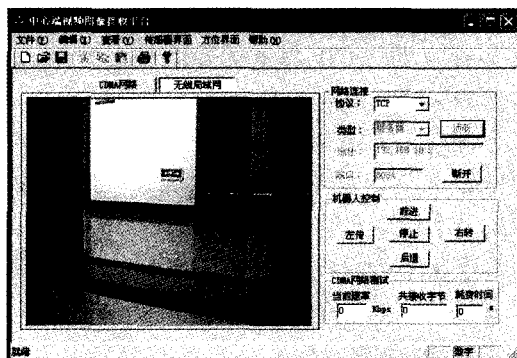
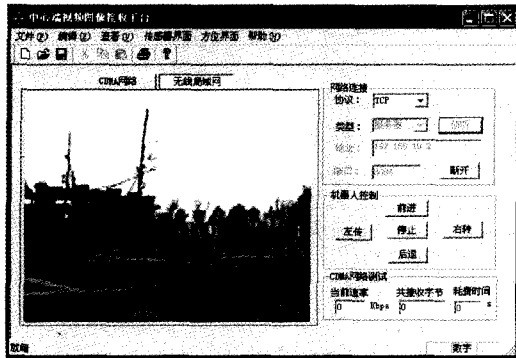


图 5 基于无线局域网接收的室内图像效果图

Fig.5 Effect picture of indoor image based on WLAN receiver



(a)



(b)

图6 基于无线局域网接收的室外图像效果图
Fig.6 Effect picture of outdoor image based on WLAN receiver

实验的总体性能如下:

(1) 在网络链接建立后, 采用 TCP 协议传输, 中心端接收 1 帧 QCIF 格式 (176×144) 的图像一般需要 1 s 左右, 接收 1 帧 CIF 格式 (352×288) 的图像一般需要 3 ~ 5 s, 而 1 帧 D1 格式 (720×576) 的图像则需要 6 ~ 8 s 传送. 该时间主要与图像复杂度、压缩比、CDMA 当前网络带宽、丢包情况及采用的传输协议有关.

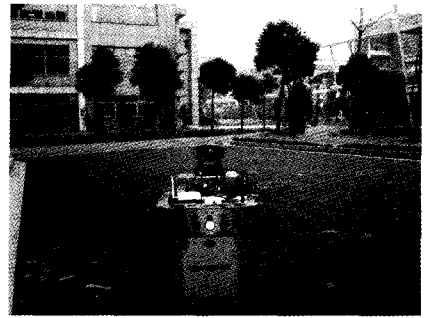
(2) 从 DSP 终端启动图像采集开始到中心端开始接收数据, 一般需要 6 s 左右, 这一时间主要由终端串口发送速率、网络传输延迟决定, 测试表明, 当发送端串口速率达 115 200 bit/s 时, 可降低系统时延到 3 s 左右.

(3) 图像数据的 JPEG 压缩比一般为 15 ~ 20, 图 7(b) 中接收到的 CIF 格式图像的大小为 16.5 kB, 压缩比为 18.432.

(4) 机器人运动控制指令均采用短帧格式, 在测试过程中控制指令基本上无丢帧现象且时延较小, 完全满足了本机器人的应用需求.

实验中发现一些问题, 从 CDMA 无线传输的角度来说主要有以下几方面:

(1) 恰当的传输协议的选择和设计: 由于分组交换连接比电路交换连接可靠性要差一些, 因此 CDMA 数据传输中会发生一些包丢失现象. TCP 是



(a)



(b)

图7 基于 CDMA 网络接收的图像效果图
Fig.7 Effect picture of the image based on CDMA net receiver

面向连接的传输协议, 它的缓冲校验和重传机制可以保证数据的正确传输, 但在大数据量传输中很容易引起严重的时延和阻塞现象; UDP 使用数据包的方式传输数据, 而且没有内置的重发机制, 在数据丢失后不会请求重新传输, 资源开销远小于 TCP. 但在使用 UDP 作为传输协议时, 虽然图像接收速度会提高, 但可能产生图像数据丢失或乱序等问题, 图 8(a) 和 (b) 分别给出了中心端采用 UDP 协议接收数据时出现上述问题的两张图片.

因而, 在使用 UDP 作为传输协议时必须再定义一个简单的传输协议, 把图像数据分为多个包传送. 每个包头加一个序列号, 接收方根据序列号而不是收到的顺序拼装, 并且通过丢包重传机制来防止数据丢失, 当然这样会影响传输速率. 总之, 要根据实际情况和需要来选择和使用传输协议.

(2) 限于目前无线带宽, 图像流送达客户端, 并不能达到像无线局域网方式通讯一样的实时显示效果. 通过计算人在机器人面前移动到中心端时系统接收到图像的耗费时间之差, 我们测得时延在 5 s 左右, 而且快速移动时接收的图像效果变差, 会有偏色等现象发生.

(3) 实际测得的传输速率比理论值低很多. 虽然 CDMA 的理论传速高达 153.6 kbit/s, 但是通过测试不同时间段的网络传输速度, 实际测得的平均传输

速率只有 20 kbit/s 左右, 即使在凌晨 0 时以后平均传输速率也只有 30 kbit/s 左右. 图 9 给出了 CDMA 网络的传输速度测试图, 测试时间从 2007 年 10 月 14 日上午 10 时开始, 时长 1000 s. 测试结果为控制中心端的单位时间内接收的字节数.

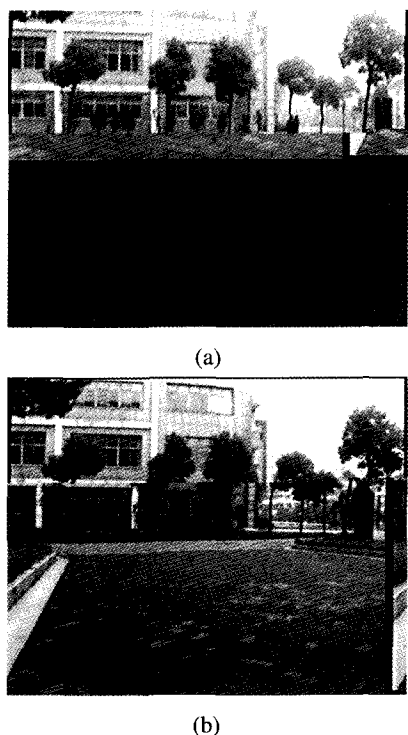


图 8 UDP 协议丢帧图像 (a) 和乱序图像 (b)

Fig.8 Frame-dropping images (a) and out-of-order images (b) of UDP protocol

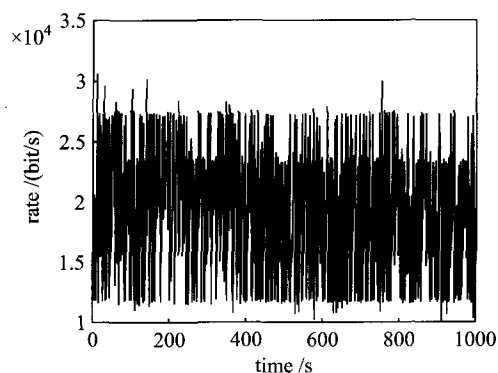


图 9 CDMA 网络传输速度测试图

Fig.9 Test graph of transmission speed of CDMA network

7 结束语 (Conclusion)

本文设计了远程机器人的视频图像无线传输系统, 满足了机器人远程探测的基本要求. 基于无线局域网实现了在室内或室外 100 m 左右 (实际距离因环境而异) 范围内约 5 frame/s CIF 格式的视频图像传输; 基于 CDMA 无线网络实现了联通信号覆盖范围内的 JPEG 图片流的传输, 为进一步实现机器人无线远程监控奠定了基础. 虽然其通讯速度仍不

够理想, 但 CDMA 通讯方式仍然是目前国内最佳的远距离、公网、广覆盖、高性价比的无线通讯方式之一. 随着 3G 技术的发展以及较强的抗误码能力和低码率压缩算法 (如 H264) 的广泛应用, 本系统中实现的技术及模块化的设计将为移动机器人技术的拓展提供借鉴.

参考文献 (References)

- [1] 刘其峰, 朱世强, 刘松国, 等. 开放式移动机器人嵌入式控制系统的设计与实现 [J]. 机电工程, 2007, 24(9): 56-58,66. Liu Qifeng, Zhu Shiqiang, Liu Songguo, et al. Design and implementation of embedded open control system of mobile robot [J]. Mechanical and Electrical Engineering Magazine, 2007, 24(9): 56-58,66.
- [2] 王春宝, 蒋梁中, 林焯华, 等. 排爆机器人控制与无线通讯系统 [J]. 微计算机信息, 2007, 23(3-2): 244-245,243. Wang Chunbao, Jiang Liangzhong, Lin Zhuohua, et al. Control and network system for explosive-removal robot[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(3-2): 244-245,243.
- [3] 刘晓燕, 李孝安, 段俊花, 等. 基于 ZigBee 的集控式足球机器人通讯系统 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(6): 740-741,744. Liu Xiaoyan, Li Xiao'an, Duan Junhua, et al. Research on communication system of centralized soccer robot based on Zig-Bee[J]. Computer Measurement and Control, 2007, 15(6): 740-741,744.
- [4] 于立萍, 姚文韬, 何克忠. 移动机器人遥控驾驶系统的设计与实现 [J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2008, 27(6): 51-56. Yu Liping, Yao Wentao, He Kezhong. The design and implementation of remote-operated driving system for mobile robot [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Nature Science, 2008, 27(6): 51-56.
- [5] Nehmzow U, Buhlmeier A, Durer H, et al. Remote control of mobile robot via Internet[R]. UK: Department of Computer Science, University of Manchester, 1996.
- [6] Wei W B, Pan Y D, Furuta K. Internet-based tele-control system for wheeled mobile robot[C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 1151-1156.
- [7] 乔卓, 姚辰, 李小凡. 利用 GPRS 系统控制移动机器人的方法研究 [J]. 机器人, 2005, 27(6): 507-511,544. Qiao Zhuo, Yao Chen, Li Xiaofan. Research on controlling mobile robots using GPRS system[J]. Robot, 2005, 27(6): 507-511,544.
- [8] Texas Instruments. TMS320DM642 video/imaging fixed-point digital signal processor[EB/OL]. (2007-07-31) [2008-10-31]. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tms320dm642.pdf>.

作者简介:

- 许 宏 (1966-), 男, 副研究员. 研究领域: 机器人技术, 流体动力控制技术, 机电一体化技术.
- 张 怡 (1986-), 女, 硕士生. 研究领域: 机器人技术, 运动控制.
- 陈锡爱 (1981-), 男, 讲师. 研究领域: 机器人技术, 图像处理.