

文章编号:1001-9081(2005)03-0685-03

人体运动实时捕捉设备 USB 通信系统设计与应用

高申玉^{1,2}, 汪光¹, 刘金刚¹

(1. 中国科学院计算技术研究所 & 首都师范大学 计算机科学联合研究院, 北京 100037;

2. 空军指挥学院 空军战术系, 北京 100089)

(gshenyu@126.com)

摘要:分析了人体运动实时捕捉设备 USB 通信子系统的各部分功能,并介绍了该子系统设计的具体方法。该设备在实际运行采集人体运动数据时,USB 通信子系统实现了实时准确的数据传输。

关键词:USB 传输;设备驱动;固件下载

中图分类号:TP274;TP311.52 **文献标识码:**A

Design and application of USB transfer system for real-time human motion capture device

GAO Shen-yu^{1,2}, WANG Guang¹, LIU Jin-gang¹

(1. Joint Faculty of Computer Scientific Research, Institute of Computing Technology,
Chinese Academy of Sciences & Capital Normal University, Beijing 100037, China;

2. Department of Air Force Tactics, Air Force Command College, Beijing 100089, China)

Abstract: This paper analysed the functions of all parts of the USB transfer subsystem in real-time human motion capture device, and introduced its detailed designing methods of this subsystem. The USB transfer subsystem can transfer exact data in real time while the device is running and collecting human motion data.

Key words: USB transfer; device driver; firmware load

0 引言

运动捕捉技术是实现计算机 3D 动画快速制作和人体运动数据采集的最佳途径。我们开发的人体运动实时捕捉设备,实现了对人体运动各主要关节的实时数据采集和 3D 空间虚拟人动态图像同步显示。

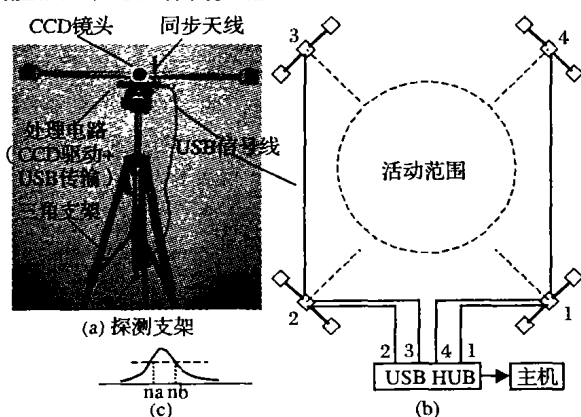


图 1

该设备主要由 4 个探测支架组成(图 1a),4 个支架通过 6 口 USB HUB 与 PC 相连。每个支架上有 3 个 CCD 镜头,左右 2 个镜头中 CCD 芯片水平安装,中间的垂直安装,4 个支架环形放置并向内探测(图 1b)。人穿上在各主要关节和部位粘贴有若干个 Marker 点(本系统采用 30 个红光二极管)的紧身外衣,由随身佩带的手机状发光控制器控制 30 个 Marker 点交替闪烁。主支架(1 号架)上同步装置控制 4 个支架共 12

个 CCD 镜头同步采集并与发光控制器无线同步工作。人在活动范围内运动时,在 1 帧(40ms)时间内,当各光源依次闪烁并经光学系统成像后作用在 CCD 像敏元上时,CCD 在一组时序脉冲信号驱动下,感光电荷进行移位输出,像敏元上感光部分输出高电平,经二值化处理和双跳变计数,得到 CCD 感光段上升沿和下降沿的像敏元序列号 na 和 nb(图 1c),此数据反映了点光源相对于 CCD 镜头的位置信息。支架上 3 个 CCD 同时工作,则可获得点光源相对支架的位置信息。由于光不具穿透性,本系统在人体周围放置 4 个支架,同步进行 3D 立体探测。将 1 帧中各支架分别对各光点采集到的数据打包并通过 USB 通信传输给上位机,进行数据解析、滤波、遴选和计算等处理,即可得各光点相对某支架的位置(即在支架坐标系中的坐标)。

系统运行前,先将与 USB HUB 相连、尺寸固定的三角形检测架放在中间,确立地面坐标系位置,依次采集检测架上 3 点光源并经空间向量的旋转、平移计算,可得各支架坐标系与地面坐标系的相互转换关系。尔后移去检测架,人体进入开始运动,系统可检测到每 1 帧中人体各 Marker 点的地面坐标数据,作为虚拟人运动图像重构的原始数据。人体在运动时,PC 机上实时动态地显示虚拟人运动和虚拟空间的图像。USB 通信子系统是整个人体运动实时捕捉设备的重要组成部分。本文简介设备工作原理,主要讨论 USB 通信子系统的设计思路和方法。

1 USB 通信系统逻辑结构

人体运动实时捕捉设备主要由光学成像、CCD 扫描与驱

收稿日期:2004-08-18;修订日期:2004-10-29 基金项目:国家 863 计划项目(2001AA114201)

作者简介:高申玉(1964-),男,安徽庐江人,副教授,博士,主要研究方向:空军战术、智能接口、虚拟现实;汪光(1963-),男,辽宁沈阳人,高级工程师,博士,主要研究方向:智能接口技术;刘金刚(1963-),男,辽宁铁岭人,教授,博士生导师,主要研究方向:智能接口技术。

动控制、同步控制、USB 通信、人体建模与虚拟重构、设备自行检测等几个子系统组成。其中 USB 通信子系统具有如下几个主要功能(图 2):

1) 将固件程序下载到支架或检测架的 USB 芯片中运行。具有 CCD 驱动与扫描控制、同步采集控制、CCD 输出信号处理、USB 数据包发送等功能的固件程序是在支架的 USB 芯片中运行的,本系统使用集成了 USB 内核和 8051 内核的 EZ_USB 芯片。将固件程序编译成 hex(或 bix)文件,由上位机应用程序下载到芯片中,因而在开发时,修改固件程序很方便,不用烧片子,提高开发效率和方便升级维护。

2) 将若干字节数据通过应用程序软写到与 I²C 总线相连的串行 EEPROM 中,作为支架的区别标志。各支架采用同一种 USB 芯片,通过各支架或检测架的串行 EEPROM 中的不同数据,应用程序能区分出各支架和检测架,便于下载相应的固件程序和识别传输上来的数据包。

3) 上位机应用程序通过 USB 传输获取各支架(包括检测架)的相关信息。这些信息主要包括支架和检测架的设备描述符、配置描述符、端点描述符和字符串描述符,其中,设备描述符是区分 USB 外设(即支架和检测架)的基本依据。

4) 支架采集到并初步整理后的 USB 数据包实时地传输给上位机。固件程序与上位机应用程序相互配合,通过若干个 USB 端点或端点配对,将 CCD 扫描采集到的各 Marker 点数据在少于 1 帧的时间内及时地传输给应用程序,由应用程序再进行数据处理和计算。

应用程序与各支架、检测架之间的上述通信方式是通过 USB 控制信号来实现的,控制信号包括各种令牌信号和握手信号,一方发出令牌信号,表示 USB 要“做什么”,另一方回应握手信号,说明己方“是否准备好,或是否收(发)正常”,应用程序与各支架之间以这种类似“一问一答”的方式进行信息交换与数据包传输。但应用程序与各支架和检测架并不直接通信,它通过访问在外设与计算机之间起桥梁作用的设备驱动程序(如 sys 文件)中的例程来与外设通信。

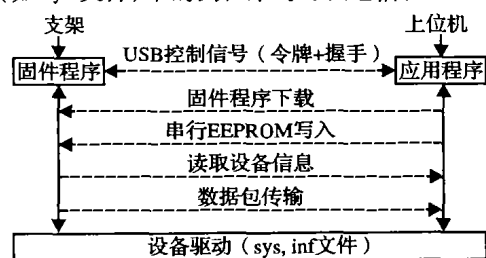


图 2

2 USB 驱动与各支架识别

2.1 设备 USB 驱动

USB 系统中所有事件均由主机发起,主机认可 USB 外设并对之进行配置、建立通信管道后,才能与之进行通信,而驱动程序则是主机认可外设的前提条件,并影响外设工作稳定性。驱动程序就像是一个容器,包含许多例程(如安装驱动程序入口 DriverEntry 例程、创建设备 AddDevice 例程等),当操作系统遇到 IRP 请求时,就调用该容器中的例程来执行 IRP 操作。

各探测支架(见图 1a)只有通过为其开发的驱动程序(sys 文件和 inf 安装文件),才能为计算机所认可,再由应用程序实现两者间数据通信。我们使用 DriverStudio 工具包中提供的 DriverWorks 工具为人体运动实时捕捉设备开发了

WDM 驱动程序,根据芯片功能和该设备对 USB 通信的要求适当修改生成的代码,用 DDK 编译生成 sys 文件,或将代码转换成 VC 工程,利用 VC 环境(需含小精灵工具 DDAppWiz. awx)直接编译产生 sys 文件。

2.2 上位机对各支架和检测架的识别

在支架首次连接时,USB 芯片 I²C 总线上串行 EEPROM 的内容为空,主机读取 USB 芯片内存存储区的缺省 VID 和 PID 号,应用程序通过发送“写”请求,将 7 字节数据(如“B0 47 05 01 10 01 00”)写入 EEPROM 中,断开再连接时,因其 I²C 总线上有一串行 EEPROM 且第 1 字节为 0xB0,系统从外 EEPROM 的第 2~7 字节中读取 6 字节数值作为设备 VID/PID/DID 号,上位机以此数据来认知设备,即该设备 VID=0547H, PID=1001H, DID=0001H。在实际应用中,我们以 PID 号不同来区分各支架,将 4 个支架(设备名依次为“支架 01”至“支架 04”)和检测架的 PID 号依次设定为 1001H~1004H 和 1011H。当 4 个支架和检测架通过 USB HUB 与主机相连、系统运行时,主机先进行 USB 枚举,应用程序依次调用 bOpenDriver(&hDevice, pcDriverName) 函数打开各相连的 USB 设备,并默认其设备名为“Ezusb-0”,“Ezusb-1”……但尚不能确定它们分别对应哪个支架或检测架。为了能让主机识别它们并与之通信,应用程序先将它们存入数组 USB_Name[],在打开某设备获得其设备句柄 hDevice 后,调用 DeviceIoControl() 函数向设备发出请求(使用标准请求 I/O 控制码 IOCTL_Ezusb_GET_DEVICE_DESCRIPTOR),以获取设备描述符。

```

BOOLbResult = DeviceIoControl(hDevice,
    IOCTL_Ezusb_GET_DEVICE_DESCRIPTOR, pvBuffer,
    sizeof(Usb_Device_Descriptor), pvBuffer,
    sizeof(Usb_Device_Descriptor),
    (unsigned long *)&nBytes, NULL);
  
```

该函数调用成功后,设备描述符(共 18 字节)数据存放在 pvBuffer 缓冲区中,其中第 11、12 字节内容即为串行 EEPROM 中 PID 数据的低位和高位。取低位数字,则可识别出各支架和检测架,应用程序界面上,设备名列表框里显示“支架 01”~“支架 04”和“检测架”,每 1 个对应 USB_Name[] 数组中的某个 USB 默认名,设备名供用户直观地控制使用,默认名供程序打开设备进行通信时调用,二者具有映射关系。

3 USB 端口使用与传输控制

3.1 待传输的数据

上位机应用程序由计时器控制,每帧(40ms)从 4 个支架各接收 1 次数据包,支架在 1 帧时间内采集人体上 30 个 Marker 点的发光数据并以 USB 数据包形式发送给上位机。人体上的 30 个 Marker 点各对应固定的标号(如肘外侧、左臂等等),其采集到的数据不能发生交错,否则人体建模将出现紊乱,图像变形。由于 CCD 对多光源点同时感光时难以区分出各光源的标号,尤其是当两个光点很近时,感光段可能重叠,则丢失信号。所以,本系统在 1 帧时间内,CCD 脉冲驱动又分为 30 个小周期,每个小周期对应 1 路 Marker。在此周期内,1 个支架采集 1 路 Marker 信号时,3 个 CCD 镜头各由双跳变计数器输出 na, nb 2 个共 6 个值,根据对设备探测精度(定位误差不大于 5mm)的要求,系统选用像敏元 3 648 个的高速线阵 CCD 芯片,计数器 12 位,6 个值占 9 字节。当人体活动光点被遮盖或超出镜头视场时,固件程序能根据计数器跳变情况判断数据是否有效,增加 1 字节用于判断。在 1 帧内将

各 Marker 信号采集完后,打包一次发送,则待传输的数据量和速度为: $4 \times 25 \times 30 \times 10B/s = 30KB/s$ 。系统 USB 传输部分完全能满足要求。

3.2 端口使用与数据传输控制

USB 有批量传输、中断传输、同步传输和控制传输 4 种方式,本系统采用批量(Bulk)传输。数据由支架传输给上位机,可供使用的 IN 端点有 1-IN ~ 7-IN 共 7 个,每个端点有最大 64B 的缓冲区,其中,偶数端点可与下一个连续编号的奇数端点配对使用,提供双缓冲区,系统在实际应用中端点使用情况如表 1 所示。

表 1 USB 端点使用情况(3 个数据包共 300B)

pipeNum	端点	使用情况	缓冲区大小	实际传输
3	4-IN	单独使用	64B	60B
1	2-IN	与 3-IN 配对	128B(双缓冲)	120B
5	6-IN	与 7-IN 配对	128B(双缓冲)	120B

传输数据时,固件程序与应用程序要协调配合:1) 固件程序首先进行端点有效性定义和配对定义,在端点配对寄存器(USBPAIR)中置需要配对的端点位为“1”,将 1 帧中该支架 3 个 CCD 镜头对 30 路 Marker 检测到的一组 na、nb 数据(300B)分段写入表 1 中的 3 个缓冲区(如前 60B 数据写入 IN4BUF 等),将传输字节数写入 IN 字节计数器(如将数 60 写入 IN4BC),启动传输。当通过 IN 控制与状态寄存器(IN4CS)中相关位判断为“闲”时,再启动其他端点传输,直至将 3 个包发出。2) 应用程序首先调用 bOpenDriver() 函数打开设备(支架),分别从相应管道(pipeNum)依次读取上述 3 个数据包,如读取 4-IN 对应的 60B 数据包时函数调用为:

```
bulkControl.pipeNum = 3;
bResult4IN = DeviceIoControl(hDevice,
    IOCTL_EZUSB_BULK_READ, &bulkControl,
    sizeof(BULK_TRANSFER_CONTROL), Buffer4IN,
    Length4IN, &nBytes4IN, NULL);
```

所传数据写入 Buffer4IN 缓冲区,包大小(60)写入 nBytes4IN 变量。3 个包合并,则得到 1 帧中从某支架传输上来的完整数据包(300B)。

4 数据包解析与数据预处理

从 4 个支架传输上来的 4 个数据包要进行解析和预处理后,才能用于计算,求得 1 帧中各 Marker 点的支架坐标并转化为地面坐标,最终提供给人体建模和虚拟空间 3D 图像动态显示。

(上接第 684 页)

求,制造企业能主动或被动地(指制造商主动联系)找到一批能满足它们供应链优化的供应商。通过该系统证明,本方法算法效率高,在较少迭代次数时具有较好的收敛性。限于篇幅,具体算例不作描述。

参考文献:

- [1] 谢庆生. 我国制造业 ASP 的模式与发展策略[J]. 中国制造业信息化, 2003, 1(1): 66-70.
- [2] SEGEV A, GEBAUER J. B2B Procurement and Marketplace Transformation[J]. Information Technology and Management, 2001, 2(2): 241-260.
- [3] JANNYM B, LEUNG Y. Configuring a manufacturing firm's sup-

各支架传输的 300B 数据包中,每 10B 为 1 组,第 1~30 组按顺序分别对应第 1~30 路 Marker 发光时的探测数据。以 1 组为例(表 2),na、nb 以 12 位 2 进制数存入,支架上 3 个 CCD 镜头探测该路 Marker 时 3 组(na,nb)数据占 9 字节,最后 1 个字节决定上述 6 个数的有效性,由固件程序根据 CCD 扫描和双跳变计数值的特征来确定。

表 2 每组 10 字节(B1~B10)原始数据编码

字节	内容	编码
B1		na 低 8 位
B2	CCD1	nb 高 4 位, na 高 4 位
B3		nb 低 8 位
B4		na 低 8 位
B5	CCD2	nb 高 4 位, na 高 4 位
B6		nb 低 8 位
B7		na 低 8 位
B8	CCD3	nb 高 4 位, na 高 4 位
B9		b 低 8 位
B10	有效位	0 0 X X X X X X

按下列几个步骤对数据包进行解析和预处理:

1) 解析与有效性判断。通过移位等计算将数据包还原成整型数据并存入 3 维数组[Marker][支架][CCD],当由有效位决定某个数无效或该数超出实际允许范围时,该数记为 0。

2) 数字滤波。由于 CCD 像敏元很小(本系统 CCD 芯片像敏元宽为 8 微米)、CCD 镜头采用固定像距的成像方式,受 CCD 增益和温度变化等因素影响,Marker 点位置固定时,传输并显示的数据在很小范围内跳动,在保证探测精度的前提下,进行限跳、平滑等数字滤波处理,使 Marker 点稳定时,数据稳定;Marker 点移动时,数字变化具有相应的敏感度。

3) 遴选。如果某 Marker 点被 2 个以上(包括 2 个)支架探测到时,系统按一定的数据选优原则,遴选其中 1 个支架的数据。

经上述预处理,得到有效和相对稳定的探测数据,还要经过较为复杂的计算,才能得到各 Marker 点坐标数据。

参考文献:

- [1] EZ-USB Technical Reference Manual Version 1.9 [EB/OL]. <http://www.cypress.com>, 2000-05.
- [2] EZ-USB General Purpose Driver Specification [EB/OL]. <http://www.cypress.com>, 1999-02-23.
- [3] 武安河,周利莉. Windows 设备驱动程序(VxD 与 WDM)开发实务[M]. 北京:电子工业出版社, 2001.
- [4] 王有庆. CCD 应用技术[M]. 天津:天津大学出版社, 2000.

plynetwork with multiple suppliers[J]. IIE Transactions, 2002, 34(2): 663-677.

- [4] KLASTORIN TD, MOINZADEH K, SON J. Coordinating orders in supply chains through price discounts[J]. IIE Transactions, 2002, 34(2): 679689.
- [5] ZHAO W, WANG Y-Z. Coordination of joint pricing-production decisions in a supply chain[J]. IIE Transactions, 2002, 34(2): 701-715.
- [6] MUCKSTADT JA, MURRAY DH, RAPPOLD JA, et al. Guidelines for Collaborative Supply Chain System Design and Operation[J]. Information Systems Frontiers, 2001, 3(4): 427-453.