

五自由度光电鼠标:能实现三维空间交互的 新型 USB 鼠标的设计与实现

王兴凤,秦开怀

(1.清华大学计算机科学与技术系,北京 100084)

摘要: 为满足虚拟现实、网络游戏和手术模拟等的需求,本文设计并实现了一种能实现三维空间交互的新型五自由度 USB 光电鼠标,该鼠标在传统二维鼠标的基础上增加 2 个自由度,这 2 个自由度以滚轮的形式分布在鼠标的两侧,分别实现绕 X 轴和 Y 轴的旋转,从而实现 5 个自由度的交互输入.文中给出了硬件电路、固化程序、驱动程序、样机和应用系统的设计等.该鼠标完全兼容传统的二维鼠标,接入计算机就能直接当传统的二维鼠标使用,安装新的驱动程序后能实现三维交互输入,并且不再另外需要二维鼠标的配合,单手操作即可.实验表明:该五自由度三维鼠标交互输入的效果良好,并且操作简单方便.

关键词: 计算机交互输入设备; USB 光电鼠标; 五自由度

中图分类号: TP334.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 02-0460-05

Five-Degree-of-Freedom Optical Mouse: Design and Implementation of a Novel 3D Interactive USB Mouse

WANG Xing-feng, QIN Kai-huai

(1. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A novel USB optical mouse is designed and realized for 3D interactive input, in order to meet a strong demand for virtual reality, 3D games and surgical simulation. This mouse has two more degrees of freedom than the traditional 2D mouse. The two extra degrees of freedom are added on the two sides of the mouse in the form of wheels to fulfill inputs of rotations around the X and Y axes, so there are five degrees of freedom. The hardware, firmware, device driver as well as applications of this mouse are discussed in this paper. This mouse is fully compatible with the standard 2D mouse and can be used as a 2D mouse without additional drivers. With the new driver, it is a 3D interactive input device which doesn't need an additional 2D mouse, so it can be operated with just one hand. Testing experiments with the prototype of the 3D USB optical mouse show that the five-degree-of-freedom interactive input device has good performance and convenient operation.

Key words: interactive input device; USB optical mouse; five degrees of freedom

1 引言

计算机硬件和软件的发展对 HCI (Human computer interaction, 人机交互) 设备的要求越来越高, 虚拟现实和三维游戏的兴起, 更是直接引发了对三维交互设备的需求, 鼠标是使用最广泛、也最方便的交互设备, 因此, 越来越多的人希望用鼠标不仅能控制物体的移动, 也能使被操作对象在三维空间中绕轴转动, 以实现对三维造型实体甚至整个虚拟场景的全方位浏览和其它相关操作. 可见, 现有的二维鼠标 (一般 3 个自由度, 即 X 轴、 Y 轴和 Z 轴) 已不能满足这种三维操作的需求.

近年来, 研究适合三维空间的交互设备已成为国外一些厂商和科研单位的重要课题^[1], 但是三维鼠标却不

多见. 3Dconnexion 公司推出的 spacemouse^[2] 已经面市, 它靠推、拉、扭动产生的压力来控制 6 个自由度, 并且它需要与传统的二维鼠标配合使用, 即一手操作 spacemouse 用以平移、缩放和旋转 3D 模型或场景, 另一手同时操作二维鼠标用以选择、检查或编辑等, 此外, 它价钱昂贵. Bell 实验室的 Kumar 研发出了六自由度的鼠标^[3], 该鼠标利用摄像头跟踪 6 个按特定顺序排列的 LED (发光二极管), 根据图像中 LED 的移动方向和距离模拟 6 个自由度. D. Laberge 等对 Kumar 的 6 自由度鼠标进行了改进^[4], 但是基本原理相同. B. Fröhlich 等研发的 Cubic Mouse^[5] 类似一个三维坐标系, 需要两个手一起操作它. 国内在三维交互设备方面的研究起步较晚, 燕山大学和河北工业大学合作研发出了一种并联机构的六自由度

鼠标^[6],它的核心是内部的力敏元件,靠按压和扭动来操作.这些三维鼠标都是基于力反馈或软件的,与传统的鼠标操作完全不同,使用者需要一段适应期,并且它们需要传统二维鼠标的配合才能方便地与计算机交互.

本文设计并实现了一种 USB 接口的五自由度光电鼠标,其基本思想是在传统二维光电鼠标的基础上增加两个自由度,以实现绕空间特定轴的转动.其优点是在操作模式和功能上完全兼容二维鼠标,不安装新的驱动程序能直接当传统的二维鼠标使用,安装新的驱动程序后能实现三维交互输入,并且不再另外需要二维鼠标的配合,单手操作即可,底部采用光电结构,不用总清洁,精度较高,为国内今后开发中国自主知识产权的三维人机交互设备提供了有利的参考.下面从原理、硬件和软件各方面进行介绍.

2 五自由度鼠标的空间原理

一般的空间交互器具备 6 个自由度:沿 X、Y、Z 轴的移动和绕 X、Y、Z 轴的转动.如图 1 所示,空间中直线的方向角分别为 α 、 β 、 γ ,它们的方向余弦满足

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1 \quad (1)$$

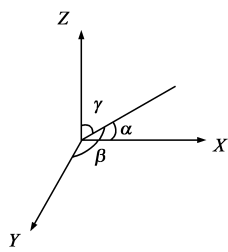


图1 空间原理

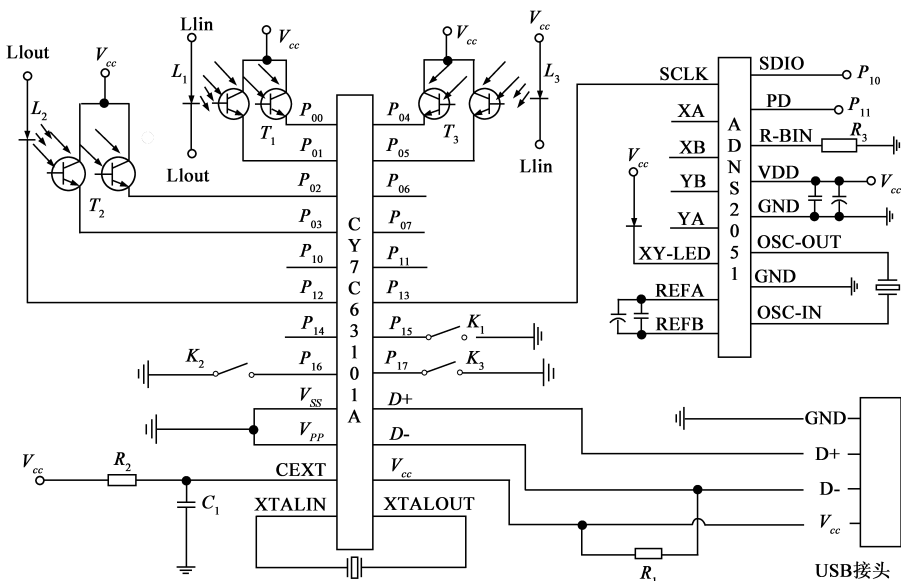


图2 五自由度USB光电鼠标的硬件电路

关系到鼠标的灵敏度,因此设计电路板以及跟机械部件配合时要尤其注意.此外,在实验过程中还发现,它的 R-BIN 管脚对干扰信号很敏感.

CY7C63101A 的主要任务是获取另外 3 个自由度的信息、获取按键信息、控制 ADNS2051 和与计算机进行通信.这 3 个自由度的原理相同,在各自由度上的相对

这就是说,空间直线与坐标轴的方向角中完全独立的只有 2 个,只需要沿 X、Y、Z 轴的移动和绕 X、Y 轴的转动就能完全实现三维空间的交互定位和输入.因此,本文的五自由度鼠标是在传统二维鼠标的基础上增加 2 个自由度,分别用于绕 X 轴和 Y 轴的旋转.

3 五自由度 USB 鼠标的硬件和软件设计

3.1 硬件电路及原理

如图 2 所示,电路中的核心器件是芯片 CY7C63101A^[7]和 ADNS2051^[8],其中 CY7C63101A 是一个 USB 微控制器,ADNS2051 是一个光学传感器.ADNS2051 包括图像拾取系统(IAS)、数字信号处理器(DSP)、双通道正交输出和双线串行端口,IAS 透过透镜和照明系统拾取极小的表面影像,这些影像经过 DSP 的处理后得到移动的方向和距离,DSP 产生的位置值,会被转换成双通道正交信号,这些信号通过正交输出或双线串行端口输出给 USB 微控制器,USB 微控制器再与计算机通信传给计算机,以控制屏幕上光标的移动或其他被控制对象的移动等.可见,ADNS2051 的主要任务就是获取鼠标沿 X、Y 轴的移动信息并传给 USB 微控制器.

ADNS2051 的感光眼很小,与用来聚光的透镜中心对准难度较大,并且感光眼与被拾取表面影像的底面(一般为桌面)之间的距离不宜超过 3mm,这些都直接

位置都是通过光学编码器和配套的元件来得到.这里的光学编码器是一个刻有均匀沟槽的圆盘,圆盘的一侧安装红外 LED,另一侧安装由两个 PT(光敏晶体管)集成的接收管,如图 3 所示.接收管的两个管脚连接在芯片 CY7C63101A 的 GPIO (general purpose input/output) 管脚上,这样即可将圆盘光栅的转动转换成接收管的电子脉

冲.芯片以轮询的方式不断地读取 GPIO 管脚的数据,将每个接收管当前的状态数据分别存储下来,并且在下一时刻将该当前状态数据存储为先前状态数据,然后查询表 1 就可以得到转换取值 c ,对于每个自由度,每次得到的 c 值都累加在事先定义好的代表该自由度状态的变量 d_i 上,其中 d_i 被初始化为 0. CY7C63101A 对于每次由 ADNS2051 传来的 X 、 Y 轴的数据也是累加在事先定义的 dx 和 dy 上,只是它们不用查询表.

此后,分别将代表各自由度状态的 d (包括 dx 、 dy 和 3 个 d_i) 与 0 进行比较,只要其中一个自由度的 d 非 0 或按键字节数据非 0,就进行中断触发将 5 个自由度连同按键共 6 个字节的数据传送给计算机.

若按图 3 当前状态,光敏晶体管的状态为 01.若圆盘逆时针转动(即图 3 中的圆盘左移),光敏晶体管的状态就为 11,如图 4(a)所示,圆盘继续逆时针转动,光敏晶体管的转换状态依次为:01—11—10—00—01.同理,圆盘顺时针转动时,如图 4(b)所示,光敏晶体管的转换状态依次为:01—00—10—11—01.从而,可以按照表 1 进行数据转换.

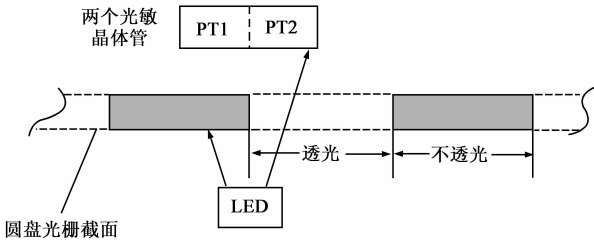


图3 圆盘光栅光学编码器的结构示意图

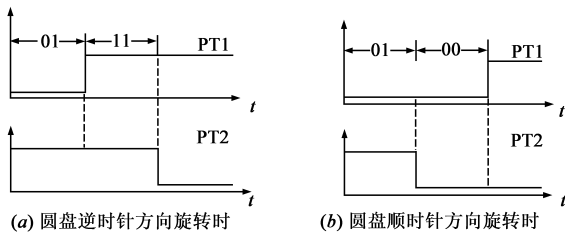


图4 PT1与PT2构成的接收管状态变化

表 1 3 个自由度的数据转换表

先前状态	当前状态	转换取值 c	先前状态	当前状态	转换取值 c
00	00	0	10	00	1
00	01	1	10	01	0
00	10	-1	10	10	0
00	11	0	10	11	-1
01	00	-1	11	00	0
01	01	0	11	01	-1
01	10	0	11	10	1
01	11	1	11	11	0

注:转换取值 c 中 0 表示不变化,正负号分别代表转动的方向.

3.2 固件设计

前面提到 ADNS2051 传数据给 CY7C63101A 有正交输出或双线串行端口输出两种方式,本文采用后者.

USB 鼠标与其他 USB HID 设备遵循同样的启动过程:设备插入、总线重置、设备列举、数据获取与转换.但是本文中在设备列举后要加入重置 ADNS2051 SPI (Serial Port Interface) 端口和确认 ADNS2051 是否准备好通信这两个步骤,如图 5 所示.

(1) 设备插入.当 USB 设备第一次连接到总线时,虽然设备上电了,但是没有任何功能,要等到总线重置后才能工作.低速设备的 USB D-端接提升电阻,它通知集线器有一个低速设备刚连接到总线上了.此时,程序以设备地址 0 开始运行,这就完成了第一步^[9].

(2) CY7C63101A 总线重置.在总线重置的过程中,除了设定堆栈指针外,也触发所有被使用到的中断.

(3) CY7C63101A 设备列举.

主机侦测与设定所有连接至根集线器的设备,设备列举就是通过主机与 CY7C63101A 之间的控制传输来识别与设定一个刚接上的 USB 设备,大致可分为以下 4 个步骤:(a)使用默认的地址 0 取得设备描述符;(b)设定设备地址;(c)使用新的地址取得设备描述符;(d)取得配置描述符等.

USB 鼠标的描述符中比较特殊的是报告描述符,它定义了执行设备功能的数据格式和使用方法.HID 传输的设备数据必须使用一个定义过的报告格式,在报告里描述了数据的大小和内容^[10].报告描述符是 HID 类特有的,因此它必须遵循 HID 规范.

(4) ADNS2051 SPI 端口重置.此处重置使得 ADNS2051 进入正常工作模式并与 CY7C63101A 同步.

(5) ADNS2051 是否准备好通信确认.通过读取 ADNS2051 的 Product_ID 寄存器数据来确认,若读出来为 0x02,则表示已经准备好了,否则就要再重置 ADNS2051 的 SPI 端口.

(6) 数据捕捉与转换.固化程序的主要工作就是不断地轮询开关和各自由度的数据,这通过端点 1 的中断服务程序传送给主机.如表 2 所示,共传送 6 个字节:1, 2, ..., 6;每个字节 8 位: D_0, D_1, \dots, D_7 .此处传送时该数据结构完全兼容微软 Windows 下的三自由度鼠标数据结构,重置后这些数据都为 0.

在固化程序中将捕捉到的按键数据取反,使得按键被按下时其对应位为 1,松开时为 0,即左键、右键和中键按下时传给主机的第一个字节分别为 1、2 和 4,按键弹起后皆为 0;自由度的数据较复杂,由 CY7C63101A

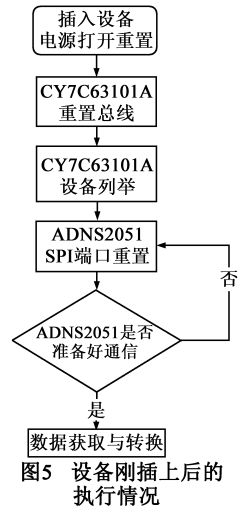


表 2 五自由度鼠标的传送数据结构

字节	位数→	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	功能
1		0	0	0	0	0	M	R	L	中/右/左按键
2		X ₇	X ₆	X ₅	X ₄	X ₃	X ₂	X ₁	X ₀	X 轴
3		Y ₇	Y ₆	Y ₅	Y ₄	Y ₃	Y ₂	Y ₁	Y ₀	Y 轴
4		Z ₇	Z ₆	Z ₅	Z ₄	Z ₃	Z ₂	Z ₁	Z ₀	Z 轴
5		R _{x7}	R _{x6}	R _{x5}	R _{x4}	R _{x3}	R _{x2}	R _{x1}	R _{x0}	绕 R _x 轴旋转的角度
6		R _{y7}	R _{y6}	R _{y5}	R _{y4}	R _{y3}	R _{y2}	R _{y1}	R _{y0}	绕 R _y 轴旋转的角度

直接获取的 Z 、 R_x (绕 X 轴旋转)和 R_y (绕 Y 轴旋转)这 3 个自由度按照前面的表 1 进行转换,而由 ADNS2051 获取的 X 和 Y 自由度直接传送即可。

3.3 驱动程序设计

本文的五自由度鼠标与现有的三自由度鼠标是完全兼容的,因此,这里只需设计一个过滤驱动程序,把增加的 2 个自由度的数据过滤出来传给应用系统进行处理,从而,在应用系统中定义这 2 个自由度的功能。

过滤驱动程序是一种特殊类型的中间驱动程序,它是不可见的,它截获发送给低层驱动程序的 Device 对象的请求,而低层驱动程序的用户完全不知道所进行的一切。过滤驱动程序与其他中间驱动程序的主要区别是它创建的 Device 对象没有名字,它通过把这个没有名字的 Device 对象挂接到由某个低层驱动程序创建的 Device 对象来工作^[11]。

由于过滤驱动程序没有任何名字,不便于与应用系统建立连接,因此,这里除了创建过滤驱动程序本身的 Device 对象 1 外,再另外创建了一个 Device 对象 2,并在程序中定义全局变量,在 Device 对象 1 中通过 IRP_MJ_INTERNAL_DEVICE_CONTROL 功能代码将低层传来的数据截获并传给全局变量,再由全局变量通过 Device 对象 2 中的 IRP_MJ_DEVICE_CONTROL 功能代码传给某一缓冲区,最后用 Device 对象 2 与应用系统建立

连接,在应用系统中用 DeviceIoControl 函数把数据取出来并进行处理。

4 应用系统举例与实验研究

这里的应用系统举例对前面的硬件电路、固化程序和驱动程序进行综合说明。该系统是在由草坪和蓝天等构成的三维空间中放置一个齿轮,用本文的五自由度三维光电鼠标控制齿轮的位置:沿 X 、 Y 、 Z 轴移动和绕 X 轴、 Y 轴旋转。程序的主要流程如下:(1)程序初始化;(2)与驱动程序进行通信,利用后台线程回调函数得到本文三维鼠标传来的数据;(3)分别对鼠标沿 X 、 Y 、 Z 轴的移动进行事件响应,得到鼠标此时输入的 x 、 y 、 z 值;(4)分别对鼠标绕 X 、 Y 轴的旋转进行消息响应,得到鼠标绕 X 、 Y 轴旋转的角度值 R_x 和 R_y ;(5)利用 OpenGL 绘制场景(如本例子中的草坪和天空等);(6)根据鼠标此时输入的 x 、 y 、 z 、 R_x 和 R_y 值控制物体(如本例子中的齿轮)的位置并进行绘制;(7)释放程序中申请的内存等资源。

图 6 展示了本文鼠标在应用系统中的实验结果,图 6(b)、(c)和(d)为分别沿 X 、 Y 和 Z 轴平移的结果;图 6(e)为绕 X 轴旋转后的结果,即滚动鼠标上 R_x 自由度对应的滚轮;图 6(f)为绕 Y 轴旋转后的结果,即滚动鼠标上 R_y 自由度对应的滚轮。

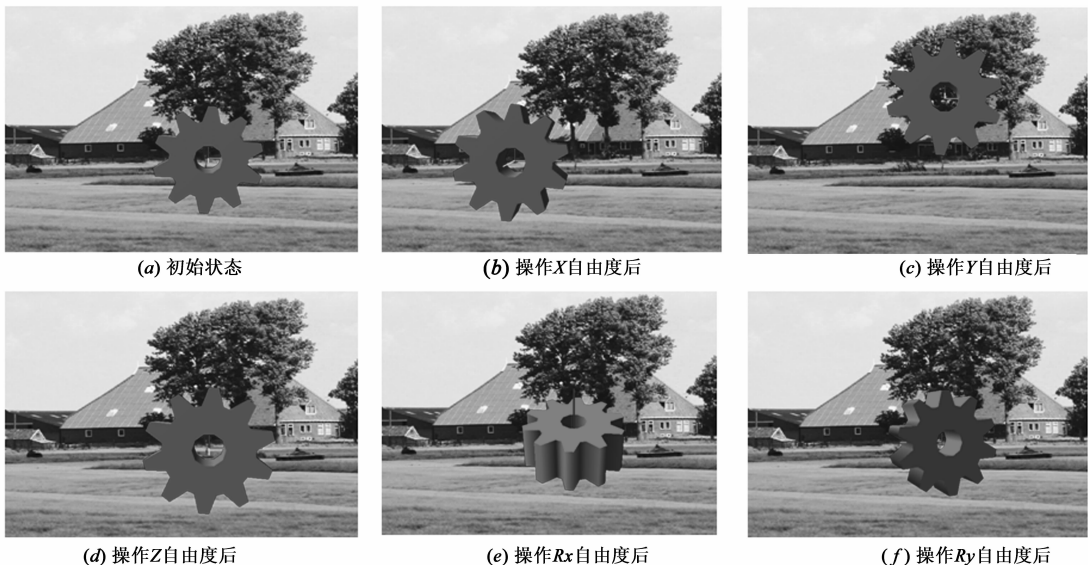
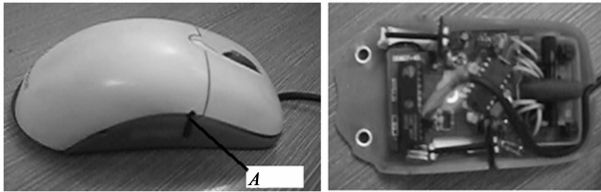


图6 实验结果

在本应用系统中,对沿 X 、 Y 、 Z 轴移动和左中右按键的事件响应是直接调用 VC++ 的事件响应函数 On-MouseMove()等,而对于绕 X 和 Y 轴的旋转是自己创建的事件响应函数,因此, R_x 和 R_y 自由度可实现绕任意轴作旋转运动,此外,根据个人的操作习惯还可以实现 R_x 轴和 R_y 轴的相互切换。

5 样机

本文制作了五自由度三维光电鼠标样机,它的外壳是用现有旧鼠标的外壳改装而成的,如图 7 所示。新增的 2 个自由度分布在两侧(图 7(a)中的 A 即为新增的自由度之一,分布在鼠标右侧),用以实现分别绕 X 轴和 Y 轴旋转的功能,分别用大拇指和无名指(或中指)操作,符合人体工程学原理,按键和其他自由度的位置和操作都与二维(3 个自由度)鼠标保持不变。



(a) 外观 (b) 内部结构
图7 五自由度USB光电鼠标样机

6 结论

本文研究并实现了五自由度三维 USB 光电鼠标的硬件电路、固化程序、驱动程序和应用系统举例,整个过程都经实验证明。本文的五自由度三维鼠标完全兼容传统的二维鼠标,操作简单方便,实验结果表明该鼠标交互定位和输入的效果很好;利用已有的芯片,既方便又经济,与市场上的二维鼠标成本差不多。本文实现了具有自主知识产权的三维鼠标的软硬件设计和开发,在虚拟现实、仿真、手术模拟、三维网络游戏等领域都有着极其广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Pausch R, T Burnette, D Brockway, et al. Navigation and locomotion in virtual worlds via flight into hand-held miniatures [A]. Proceedings of SIGGRAPH 95 [C]. Los Angeles, CA: ACM, Press, 1995. 399 - 400.
- [2] RSI Gmbh. SpaceMouse Products [EB/OL]. http://www.rsi.gmbh.de/spacemouse_e.htm. 2007-05-15.

- [3] Kumar S. 6d-mouse: A vision-based computer input device [R]. USA, Bell Laboratories, 2000.
- [4] Laberge D, Lapointe J F, Petriu E M, Boulanger P. 6-D mouse for virtual environments [A]. Proceedings of HAVE 2002-IEEE Workshop on Haptic Virtual Environments and their Applications [C]. Ottawa, Ontario, Canada, 2002. 37 - 41.
- [5] B Fröhlich, J Plate. The cubic mouse: A new device for 3D input [A]. ACM CHI 2000 [C]. New York: ACM Press, 2000. 526 - 531.
- [6] 赵现朝, 高峰. 并联机构的六维鼠标研制开发 [J]. 机械设计, 2003, 20(6): 15 - 17.
Zhao Xianchao, Gao Feng. Development of a six dimensional mouse in parallel mechanisms [J]. Journal of Machine Design, 2003, 20(6): 15 - 17. (in Chinese)
- [7] Cypress Semiconductor Corporation. Designing a low-cost USB mouse with the cypress semiconductor CY7C63000 USB controller [R]. Singapore: Cypress Corporation, 1997.
- [8] Agilent Technologies, Inc. Agilent ADNS-2051 Optical Mouse Sensor Data Sheet [R]. United States: Agilent Corporation, 2002.
- [9] 许永和. USB 外围设备设计与应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
XU Yonghe. The Design and Application of USB Peripheral Equipment [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002. (in Chinese)
- [10] USB Implementers' Forum. Universal serial bus (USB) HID usage tables [S]. Version 1.11, 2001-06-27.
- [11] Baker A. The Windows NT Device Driver Book: A Guide for Programmers [M]. USA: Prentice Hall Inc, 1997.

作者简介:



王兴凤 女, 1982 年 4 月出生于湖北省潜江市, 博士研究生, 主要研究方向为人机交互和计算机图形学。
E-mail: wangxf04@mails.tsinghua.edu.cn

秦开怀 男, 1958 年出生于湖北省, 教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机图形学, 数字几何处理(小波变换及多分辨率几何造型), 真实感图形实时绘制、动画与虚拟现实, 组合显示/多投影组合显示墙, 计算机视觉、图像处理与可视化等。
E-mail: qkh-dcs@tsinghua.edu.cn