

文章编号: 2095—0411 (2014) 03 - 0006 - 07

# 基于 Kinect 骨骼跟踪技术的人机交互<sup>\*</sup>

吴 秦, 陈 智, 周宇旋, 梁久祯

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 基于 Kinect 提供的深度信息和骨骼跟踪技术进行手势识别, 利用手势代替鼠标实现人机交互。首先, 引入以人体为参考系的人体坐标系, 将手势位置通过坐标系变换映射到计算机屏幕, 实现计算机屏幕上光标的位置显示和跟踪。其次, 研究计算机操作系统响应鼠标事件的工作模式, 设计固定的手势静态及动态工作模式, 通过一定的映射关系将特定的一组手势与计算机系统基本操作指令进行对应。并定义状态机, 根据手势状态触发系统操作事件, 从而达到对计算机系统的体感控制。实验表明, 该人机交互系统自然、合理、有效。

**关键词:** 人机交互; Kinect; 骨骼跟踪; 人体坐标; 延迟帧; 手势操控

中图分类号: TP 391

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095—0411.2014.03.002

## Human-Computer Interaction Based on Kinect Skeletal Tracking

WU Qin, CHEN Zhi, ZHOU Yu-xuan, LIANG Jiu-zhen

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** The depth information and skeletal tracking provided by Kinect can be used for hand gesture recognition. A new human-computer interaction method is proposed by replacing mouse operations with hand gestures. Firstly, to display the location of the cursor and tracking it accurately on the computer screen, a human-based coordinate system is introduced and hand gestures are mapped to the computer screen by coordinate transformation. Secondly, the response mode of the computer operating system to mouse events is studied. The fixed modes of static and dynamic hand gestures are designed. A mapping between a specific set of hand gestures and computer responds to basic system controls are defined. And a state machine is described to trigger system events based on hand gestures. Experiments show that the proposed human - computer interaction system based on hand gestures is natural, reasonable and effective.

**Key words:** human-computer interaction; Kinect; skeletal tracking; human-based coordinate; delayed frame; hand gesture control

人机交互 (Human-Computer Interaction, HCI) 是指人与计算机之间使用某种输入、输出设备, 以一定的方式交互, 实现人与计算机对话的技

术<sup>[1-2]</sup>。人机交互的发展经历了早期的手工作业阶段、作业控制语言及交互命令语言阶段、图形用户界面 (GUI) 阶段、网络用户界面阶段、多通道与

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2014 - 01 - 12。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (61202312); 教育部留学回国人员科研启动基金资助。

作者简介: 吴秦 (1978—), 女, 江苏宜兴人, 博士, 副教授, 主要从事计算机视觉、模式识别研究。E-mail: qinwu@jiangnan.edu.cn

多媒体的智能人机交互阶段<sup>[3]</sup>。随着信息产业的发展,传统的交互方式已经满足不了人们对人机交互方面的需求。

与传统的交互方式不同,自然交互方式<sup>[4]</sup>更多的是基于人与人的交互,当在和机器进行交互时感觉更像是在和人交互。目前,众多研究者都在探寻更为高效、更加简单方便、更加人性智能化的交互方式,例如第六感设备<sup>[5]</sup>,追影技术、虚拟现实、增强现实、多点触控、语音识别、眼球跟踪、人脸识别、体感操作及脑机界面等<sup>[6]</sup>。

Kinect 是一种智能人机交互设备,目前已经有研究者尝试用 Kinect 体感设备识别出的手势来实现对计算机系统的操控<sup>[7-9]</sup>。这些研究虽然实现了一部分手势操控计算机系统的功能,但还存在手势操控系统不完善,手势设计不够人性化,操控精度尚未达到实用化标准等问题。

本文基于 Kinect 提供的骨骼跟踪技术识别人的手势动作,实现远距离、手势替代鼠标进行人机交互。将手势位置通过坐标系变换映射到计算机屏幕,从而实现计算机屏幕上光标的位置移动和跟踪。同时,研究计算机操作系统响应鼠标事件的工作模式,设计固定的手势静态以及动态工作模式,通过一定的映射关系将特定的一组手势与计算机系统基本操控进行对应。根据 Kinect 手势识别结果和自定义的状态机实现计算机操作控制,从而达到对计算机系统的体感控制。实验表明,本文设计的手势系统自然、合理、有效。

# 1 Kinect 骨骼跟踪技术

Kinect 传感器设备为主机提供 3 大类的原始数据流信息,其中包括深度数据流 (depth stream)、彩色视频流 (color stream)、原始音频数据 (raw audio stream)<sup>[10]</sup>。分别对应的处理过程为骨骼跟踪 (Skeletal Tracking)<sup>[11]</sup>、身份识别 (Identify) 和语音识别 (Speech Pipeline)。基于 Kinect 的各种应用层出不穷,例如利用 kinect 深度信息对行人进行识别与跟踪<sup>[12]</sup>、基于 kinect 的 google 地图导航<sup>[13]</sup>、3D 场景建模<sup>[14-15]</sup>、物理治疗<sup>[16-17]</sup>等。

骨骼跟踪是 Kinect “体感操作”的基础,它要求系统要在可接受的延时范围内,快速的构建出用户的 3D 模型。为了能够快速的传输有效数据,系统通过机器学习和模式识别的方法来压缩感知原始数据 (raw data),构建火柴人的骨骼节点。

在深度测量方面,微软 Kinect 采用命名为

Light Coding 的深度测量技术。经过红外投影机和红外摄像头得到近红外光谱,而后处理得到关键的深度图像,微软 Kinect 再把深度图像转化成对系统起到重大意义的骨骼图像。实际应用系统中,许多功能都是基于骨骼图像来实现的<sup>[18]</sup>。深度图像生成骨骼图像的效果图如图 1 所示。从深度图像转换成骨骼图像需要经过识别人体、识别人体部位、识别关节点等 3 大步骤。

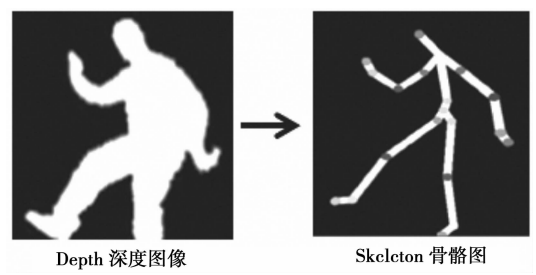


图 1 从深度图像到骨骼图像

Fig. 1 From depth image to skeleton image

第 1 步:人体识别。在深度图像中,利用边缘检测、噪声阈值处理、对人体目标特征点分类等技术将人体从背景环境中区分出来,并为每个被追踪的个体在深度图像中创建“分割遮罩”(Segmentation mask,将背景物体剔除后的用户深度图像)。Kinect 在后续对深度图像处理流程中仅传送分割遮罩数据,以降低计算压力。如图 2 所示。

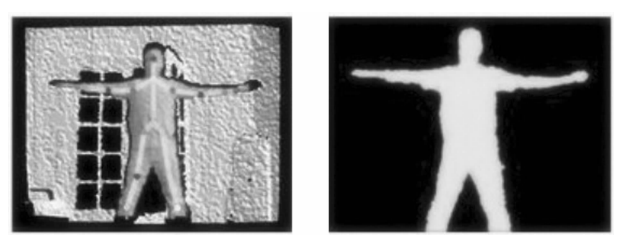


图 2 人与背景图像分离

Fig. 2 Separate human body from background

第 2 步:人体部位分类。本环节利用人体识别这一步骤中将目标从背景图像中剥离出来的人体深度图像,从中识别出人体各个部位的过程。Kinect 通过已提取的人体各部分的特征值来进行快速识别,目前 Kinect 可以识别出 32 个人体部位。

第 3 步:关节识别。在关节识别部分, Kinect 以达芬奇的“维特鲁威人”为蓝本的,对人体关节点进行定义及选取<sup>[6]</sup>。人体关节点识别使用机器学习的方法对已识别出的 32 个人体部位信息进行分析识别,从而得到人体的 20 个关节点数据。考虑到人体部位被遮盖或重叠的问题, Kinect 分别从正面、侧面、复试角度进行分析学习,通过相邻关

节点信息以及机器学习的结果来进行准确的部位推测。系统根据骨骼跟踪的 20 个关节点信息生成一幅骨架结构图（如图 3 所示）。骨骼跟踪的每个关节（Joint）有 Tracked（已跟踪）、Not Tracked（未跟踪）和 Inferred（推测而来）3 种状态。

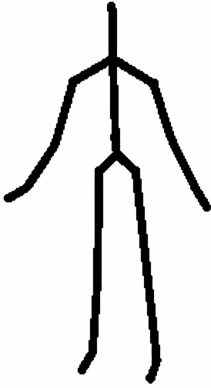


图 3 骨架信息  
Fig. 3 Skeleton information

## 2 人机交互

为了实现手势代替鼠标进行人机交互，使用 Kinect 作为手势获取工具，以 Kinect 提供的深度信息和骨骼跟踪数据为基础，识别出不同的手势。将手势位置通过坐标变换映射到计算机屏幕，从而实现计算机屏幕上光标的位置移动和跟踪。同时，定义手势变换与鼠标事件的对应关系，并定义状态机，由状态机根据手势状态触发操作事件。系统的实现流程如图 4 所示。其中，最关键的步骤是人体坐标映射、手势与鼠标操作映射，以及触发操作事件的状态机定义。

### 2.1 人体坐标映射

为了模拟鼠标在计算机屏幕上的移动和定位，需要将通过 Kinect 获取的手部位置信息即时映射到计算机屏幕上。Kinect 提供的骨骼跟踪数据是以 Kinect 为基准的骨骼跟踪坐标系。计算机的屏幕坐标系则是以屏幕左上角为原点，横向向右为 X 轴，竖直向下为 Y 轴的坐标系。因此，在将 Kinect 提供的骨骼跟踪数据映射到屏幕时，需要进行相应的坐标映射。

#### 2.1.1 简单的坐标映射

最简单的映射方式是把骨骼跟踪坐标系的原点定为屏幕的中心位置，再对骨骼坐标数据进行缩放，然后把骨骼坐标映射到计算机屏幕坐标中而得到屏幕坐标，如图 5 所示。

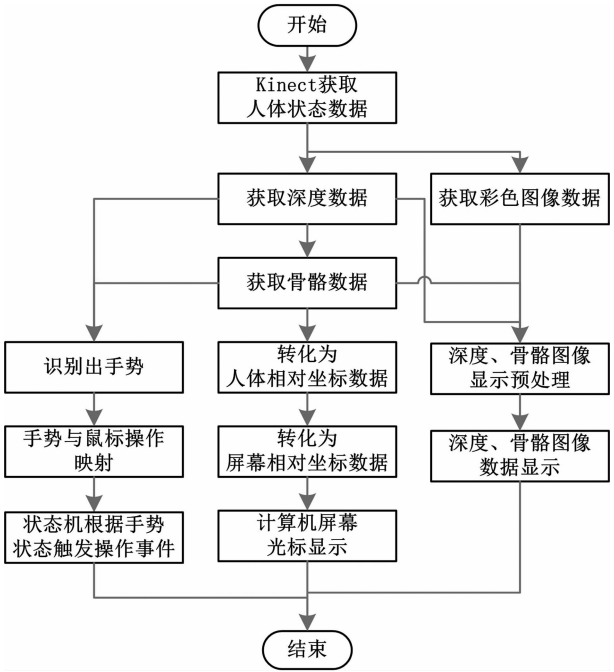


图 4 基于 Kinect 骨骼跟踪技术的人机交互系统流程图  
Fig. 4 Procedure of human computer interaction based on Kinect skeletal tracking

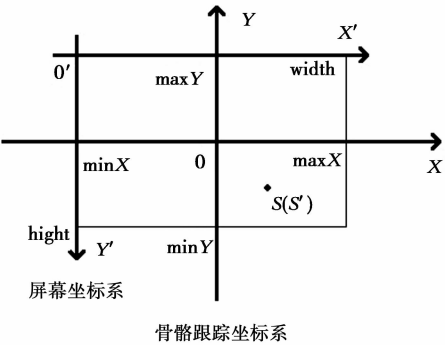


图 5 骨骼坐标系映射到屏幕坐标系  
Fig. 5 Mapping from skeleton coordinate system to computer screen coordinate system

其中 XY 坐标系表示骨骼跟踪坐标系，该坐标系中的点坐标为  $S(x, y)$ ； $X'Y'$  坐标系表示屏幕坐标系，该坐标系中的点坐标为  $S'(x', y')$ 。简单映射方式的坐标映射公式如下：

$$x' = \frac{x}{\max X - \min X} \times \text{width} + \frac{\text{width}}{2}$$
$$y' = \frac{\text{height}}{2} - \frac{y}{\max Y - \min Y} \times \text{height}$$

#### 2.1.2 以人体为中心的坐标映射

在实际使用过程中，简单映射存在很多弊端，并不能满足使用者的要求。例如，人有时并非正对着 Kinect 设备，导致手被误激活；人的中心位置也并非时刻处于骨骼跟踪坐标系的中心位置，当人

移动到 Kinect 视角范围的边缘时,手的移动区域就会出现不能覆盖整个屏幕要求的区域这一状况。

为解决这些问题,本文设计了一种以人体为中心的坐标映射方式。该映射方式先把骨骼跟踪坐标系下的数据转化为人体坐标系下的数据,在人体坐标系下进行处理,最后在把人体坐标系下需要操作的坐标映射到屏幕坐标。坐标系映射整体流程如图 6 所示。其中,骨骼跟踪坐标映射人体坐标系的示意图如图 7 所示。

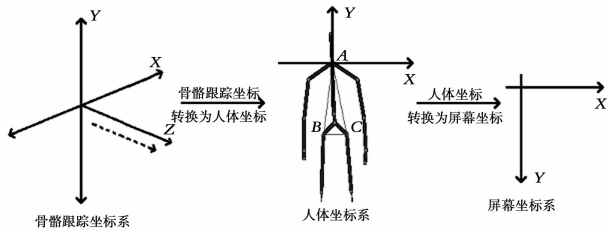


图 6 以人体为中心的坐标映射方式坐标转换图

Fig. 6 Coordinate transformation with human body as center

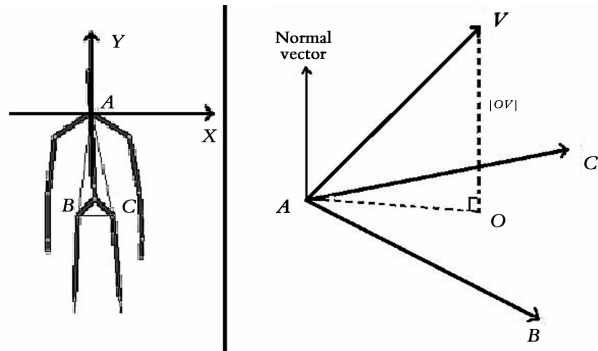


图 7 人体坐标系及映射到人体坐标系方法

Fig. 7 Human body based coordinate system and corresponding mapping method

人体坐标系定义如下:以肩部中心(点 A)为原点;以肩部中心、左腕部关节(点 B)、右腕部关节(点 C)确定的空间平面为人体空间坐标系 X-Y 轴平面;平面 ABC 中水平方向向右为人体坐标系的 X 轴;在平面 ABC 中竖直方向向上为人体坐标系的 Y 轴;以  $\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC}$  得到的法向量方向为人体坐标系的 Z 轴。点 O 是点 V 在人体坐标系中对应的映射坐标。

根据图 7,人体平面法向量为:

$$n = \frac{\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC}}{|\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC}|}$$

手 V 到人体平面的距离为:

$$|\overrightarrow{OV}| = n \times \overrightarrow{AV} = \frac{\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC}}{|\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC}|} \times \overrightarrow{AV}$$

手 V 映射到人体坐标系中的坐标为:

$$\overrightarrow{AO} = \overrightarrow{AV} - |\overrightarrow{OV}| \times \frac{\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC}}{|\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC}|}$$

通过以上转换公式,完成由骨骼跟踪坐标转换为人体坐标。再将人体坐标系坐标映射到屏幕坐标系中时,为使左右手都能够在舒适的移动范围内控制鼠标移动,人体坐标系的原点并非映射到屏幕坐标的中心位置,而且根据选中左手还是右手来确定映射坐标。具体映射公式如下:

$$x' = \frac{x - \min X}{\max X - \min X} \times \text{width} + X_t$$

$$y' = Y_t - \frac{y - \min Y}{\max Y - \min Y} \times \text{height}$$

其中  $(X_t, Y_t)$  为人体坐标系原点映射到屏幕坐标系中的坐标;  $S(x, y)$  为人体坐标系中的坐标点;  $S'(x', y')$  是计算机屏幕坐标系中的对应坐标点。

## 2.2 手势与鼠标操作映射

为了模拟鼠标事件,本文定义了手势操作方式到计算机鼠标操作事件的映射,采用的手势基本操作事件有 doMove、doGrip、doGripRelease 3 种,采用与之对应的计算机鼠标事件为鼠标移动事件(Move)、鼠标左键按下事件(LeftDown)、鼠标左键抬起事件(LeftUp)。根据手势操作事件与计算机鼠标事件的映射关系,并结合计算机常用操作,本文定义了 3 种计算机较为常用的鼠标操作高级事件:左键单击选取操作事件、左键选中移动操作事件、左键双击打开操作事件。

### 2.2.1 左键单击选取操作事件

该操作由连续的鼠标 LeftDown 事件和 LeftUp 事件构成,分别映射为手势基本操作事件 doGrip 和 doGripRelease。左键单击选取操作事件的手势操作变化流、手势触发事件流、模拟鼠标事件流如图 8(a) 所示。其操作的流程为:先通过手的移动事件(doMove)把计算机光标移动到指定位置,再通过手的握拳和张开动作接连触发 doGrip 和 doGripRelease 事件来完成左键单击选取操作。

### 2.2.2 左键选中移动操作事件

该操作是由连续的鼠标 LeftDown 事件、Move 事件和 LeftUp 事件构成,映射为连续的手势基本操作事件 doGrip、doMove、doGripRelease。其左键选中移动操作事件的手势操作变化流、手势触发事件流、模拟鼠标事件流如图 8(b) 所示。其操作的流程为:先通过手的移动

事件 (doMove) 把计算机光标移动到指定位置, 再通过手的握拳操作触发 doGrip 事件 (即鼠标 LeftDown 事件) 来选中指定位置, 而后通过手的移动操作触发 doMove 事件 (即鼠标 Move 事件) 来移动计算机的光标, 最后通过手的张开动作触发 doGripRelease 事件 (即鼠标 LeftUp 事件) 来释放选中的目标, 并以此完成左键单击选取操作事件。

击选取事件之间有 Move 事件。

2.3 手势操作状态机

手势操作过程中, 将触发手势的诸多事件组合构成手势事件流, 本系统从触发的手势事件流中识别出计算机操作事件, 然后向计算机系统发出相应的操作指令。系统在识别计算机操作事件过程中, 会涉及并影响到与该事件有关的前后事件。也就是说, 事件的前后之间具有一定的相互影响制约关系。为了很好的识别出计算机操作事件, 本课题设计了手势操作状态机, 如图 9 所示。通过该状态机使得触发事件一目了然, 同时也尽可能的避免对计算机的异常操作。

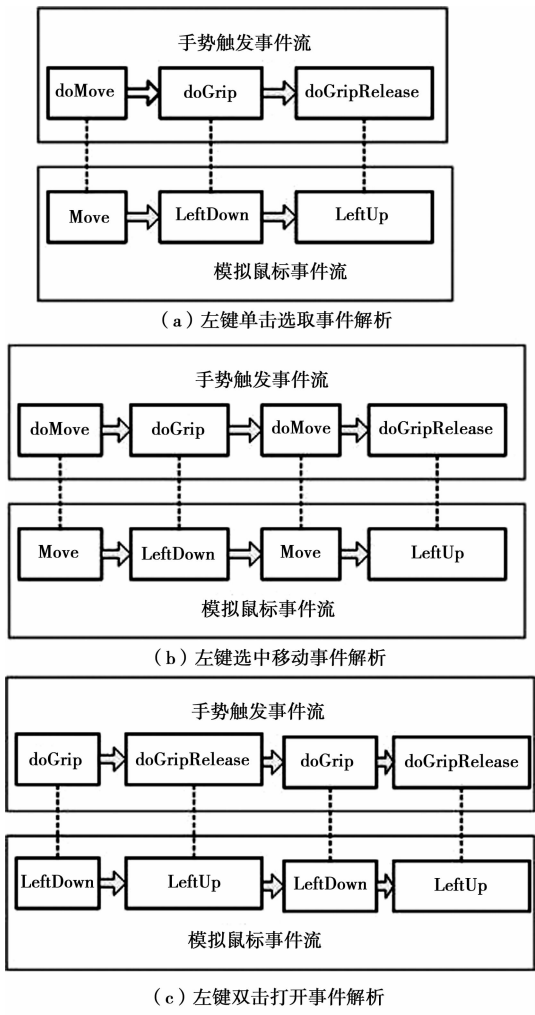


图 8 手势模拟鼠标事件解析  
Fig. 8 Simulate mouse events by hand gestures

2.2.3 左键双击打开操作事件

该操作可以认为是两次连续紧接着的鼠标 leftDown-LeftUp 事件, 映射为两次连续的手势基本操作事件 doGrip 和 doGripRelease。其左键双击打开操作事件的手势操作变化流、手势触发事件流、模拟鼠标事件流如图 8 (c) 所示。该事件与两次左键单击选取事件有类似之处, 但有很大的不同, 不同之处在于两次连续紧接着的鼠标 left-Down - LeftUp 事件之间是否有鼠标 Move 事件, 左键双击打开事件中无 Move 事件, 而两次左键单

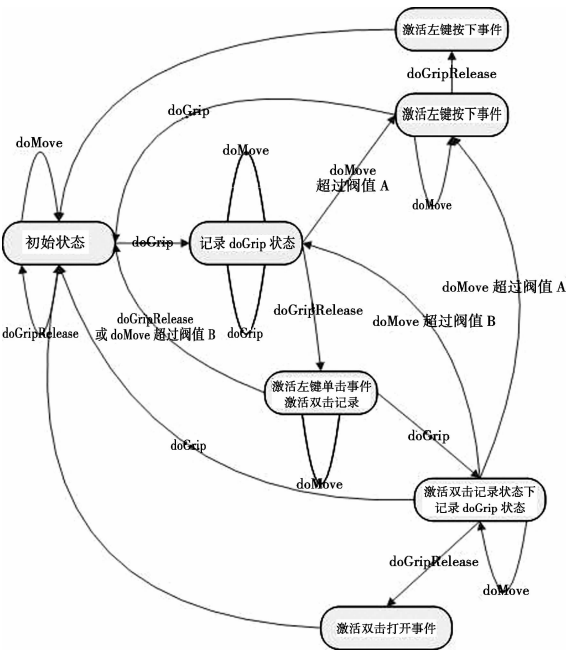


图 9 手势事件状态机  
Fig. 9 Gesture events state machine

2.4 用延迟帧技术实现手势操作高级事件

Kinect 提供的骨骼数据有时并不稳定, 存在较多的非跟踪关节点; 当人在做手的抓取和张开动作时, 手的骨骼坐标是变化的, 具有不稳定性, 这使得识别“抓取 - 张开” (Grip - to - Pan) 等动作时的坐标与使用者想要其操作的坐标有较大的距离误差。为了让使用的骨骼数据趋于稳定, 本文设置了关键骨骼关节点和被跟踪的关节点差异阈值。当关键骨骼关节点状态为 Tracking 且被跟踪的关节点数目超过阈值时骨骼数据才为有效骨骼数据, 以此来缓解骨骼数据不稳定问题。为了能够解决因手势操作而带来的操作坐标存在较大误差的问题, 系统引入了

延迟记录帧的方法。延迟记录帧的使用方法如图 10 所示, 系统定义 delayFram 为延迟帧数、MouseRecordPoints 记录每帧中有效的手所指向的屏幕坐标 (即鼠标坐标)、MaxPoint 为坐标记录上限、indexPoints 表示当前帧在帧记录表中的位置。当识别出 Grip - to - Pan 等动作而触发响应事件时, 用户操作的坐标为在此时刻之前的第 delayFram 帧中手所指向的坐标。而在此之间的数据帧被称为延迟帧。延迟帧数的选取要适当, 过小则操作的坐标与用户希望操作的坐标不同, 过大则操作延迟无法忍受。在本文实验中, 延迟帧数设为 10 帧。

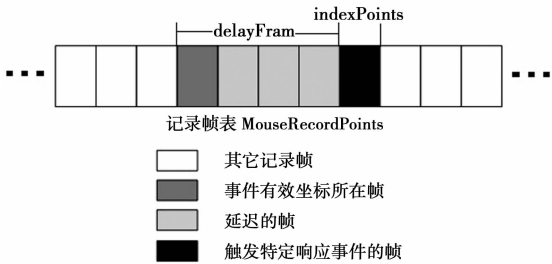


图 10 记录帧  
Fig. 10 Recording frame

### 2.5 左右手兼容

在选择使用左手还是右手操控计算机的这一问

题上, 本文采用兼容左右手的模式, 也即左手和右手都可以用来操控计算机, 但同一时刻只能有一只手被选中操控计算机, 左手和右手可以切换操控。兼容左右手操控的流程为: 根据已经处理过骨骼坐标, 当手的跟踪状态为 Tracking 且其深度超过人体平面一定距离时激活这只手的状态, 在被激活的手之间选择超过人体平面最远的那只手来操控鼠标。

### 3 实验与讨论

在开发和实验中, 使用的硬件设备包括普通 PC 机 1 台和 Kinect for Windows1 个。操作系统采用 Windows8, 开发环境采用是 Microsoft for Visual Studio Ultimate 2012, 主要使用了 Kinect for Windows SDK 和 Kinect for Windows Developer Toolkit 进行开发。

图 11 显示了通过 Kinect 捕捉到人体深度信息 (如图 11 (b) 所示)、骨骼跟踪图像 (如图 11 (c) 所示)、左手被选中控制鼠标事件 (图 11 (a) 中蓝色圆圈和红色大圆圈代表系统识别的左右手位置。红色大圆圈代表该手被选中控制鼠标事件) 这一过程。



图 11 Kinect 控制鼠标示例  
Fig. 11 An example of controlling mouse by Kinect

为了测试本系统的有效性, 让未曾使用过手势操控系统的学生对鼠标左键单击、左键选中移动、左键双击、光标移动这几个动作分别用手势进行操作。对以上每个鼠标操作分别进行 50 次操作, 实验总体识别正确率为 89.5%。同时使用混淆矩阵 (confusion matrix) 进行更进一步的系统评价, 如表 1 所示。混淆矩阵主要用于比较分类结果和实际操作的正确率和分类错误率。混淆矩阵的每一行代表给定手势的分类信息, 每一行中对角元素值代表该手势的识别正确率, 其它元素代表测试过程中被

误分为其它类别的错误率。

表 1 手势模拟鼠标事件的混淆矩阵 %				
Table 1 Confusion matrix of simulating mouse events by hand gestures %				
	左键单击	左键选中移动	左键双击	光标移动
左键单击	86	6	0	8
左键选中移动	2	90	0	8
左键双击	2	6	82	10
光标移动	0	0	0	100

实验结果表明, 单纯的“光标移动”操作能被 100% 正确的识别和显示。“左键单击”、“左键选中

移动”、“左键双击”手势操作的识别正确率分别为 86%、90%和 82%。在错误分类中,基本上都是将“左键单击”、“左键选中移动”、“左键双击”等手势操作误判为“光标移动”操作。分析其原因,主要是由于触发“左键单击”、“左键选中移动”、“左键双击”,每一个鼠标事件对应手势“抓取一张开”状态之间的一系列切换,用户手势的“抓取一张开”操作之间的时间间隔,以及系统间隔帧数阈值的设置将直接影响这些事件识别的正确率。手势误操作一般多出现在使用者刚开始接触手势操作的阶段,随着使用者的手势操作变得熟练,手势误操作问题将会逐步缓解。

## 4 结 论

本文使用 Kinect 骨骼跟踪技术,以此为基础利用手势代替鼠标实现人机交互。在光标移动方面,引入了人体坐标系。该坐标系以使用者本身为坐标系,让使用者不再古板地正对着 Kinect 操作,支持使用者在 Kinect 视角边缘或者侧面 Kinect 时也能很好的控制光标移动,并能使控制区域覆盖整个屏幕,减少因使用者所在区域及其面对 Kinect 的角度不佳而产生的系统误判误操作。并引入延迟帧的方法实现判别鼠标左键单击事件、鼠标左键选取移动文件事件、鼠标左键双击事件等。实验表明:在大多数情况下,本文开发的人机交互系统能正确地识别手势,并执行相应的计算机操控事件。

本文设计和开发的手势操控系统,用全新且更为舒适的手势来操控计算机系统,实现了良好的人机交互,为以后更为先进的全方位体感操控系统打下了一定的基础。

## 参考文献:

- [1] Stuart K Card, Moran Thomas P, Newell Allen. The key-stroke - level model for user performance time with interactive systems [J]. Communications of the ACM, 1980, 23 (7): 396 - 410.
- [2] James H Carlisle. Evaluating the impact of office automation on top management communication [C] //The National Computer Conference and Exposition. New York: ACM, 1976: 611 - 616.
- [3] Alejandro Jaimesa, Nicu Sebeb. Multimodal human - computer interaction: A survey [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2007, 108 (1): 116 - 134.
- [4] Daniel Wigdor, Dennis Wixon. 自然用户界面设计: NUI 的经验教训与设计原则 [M]. 季昱, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
- [5] Meenakshi Gupta, Shruti Sharma. Virtual Class room using six sense technology [J]. IOSR Journal of Computer Engineering, 2012, 6 (4): 20 - 25.
- [6] 于涛. Kinect 应用开发实战: 用最自然的方式与机器对话 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [7] Matthew Tan. Recognizing Hand Gestures with Microsoft's Kinect [R]. California: [s. n.], 2011.
- [8] Kam Lai, Konrad J, Ishwar P. A gesture - driven computer interface using Kinect [C] // Image Analysis and Interpretation (SSIAI). Boston: IEEE, 2012: 185 - 188.
- [9] 曾繁江, 李涛, 黎铭. Kinect 平台上使用机器学习的非接触式 GUI 操控方式 [J]. 计算机科学与探索, 2014, 8 (2): 171 - 178.
- [10] Ivan Tashev. Kinect Development kit: A toolkit for gesture and speech - based human - machine interaction [J]. IEEE Signal Process Mag, 2013, 30 (5): 129 - 131.
- [11] Juergen Gall, Carsten Stoll, Edilson de Aguiar, et al. Motion capture using joint skeleton tracking and surface estimation [C] //IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami: IEEE, 2009: 1746 - 1753.
- [12] Lu Xia, Chia - Chih Chen, Aggarwal J K. Human detection using depth information by Kinect [C] //Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). Colorado Springs: IEEE, 2011.
- [13] Maged N Kamel Boulos, Bryan J Blanchard, Cory Walker, et al. Web GIS in practice X: a microsoft Kinect natural user interface for Google Earth navigation [J]. International Journal of Health Geographics, 2011, 10: 45.
- [14] Peter Henry, Michael Krainin, Evan Herbst, et al. RGB - D mapping: Using Kinect - style depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments [J]. IJ Robotic Res, 2012, 31 (5): 647 - 663.
- [15] Ilonen J. Three - dimensional object reconstruction of symmetric objects by fusing visual and tactile sensing [J]. The International Journal of Robotics Research, 2014, 33: 321 - 341.
- [16] Yao - Jen Chang, Shu - Fang Chen, Jun - Da Huang. A Kinect - based system for physical rehabilitation: A pilot study for young adults with motor disabilities [J]. Research in Developmental Disabilities, 2011, 32 (6): 2566 - 2570.
- [17] Belinda Lange, Sebastian Koenig, Eric McConnell, et al. Interactive game - based rehabilitation using the Microsoft Kinect [C] //Virtual Reality Short Papers and Posters (VRW). Costa Mesa: IEEE, 2012, 171 - 172.
- [18] Danilo Avola, Luigi Cinque, Stefano Levialdi, et al. Human body language analysis: A preliminary study based on Kinect skeleton tracking [J]. New Trends in Image Analysis and Processing. ICIAP 2013, Lecture Notes in Computer Science, 2013, 8158: 465 - 473.