

# 基于红外结构光的三维显示用交互装置

彭祎帆 陶毅阳 于 超 李海峰 刘 旭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 三维显示以其直观自然的表現方式获得了广泛关注, 三维交互技术也随之迅猛发展。提出了一种基于红外结构光、单摄像头的实时交互系统。红外结构光投影对空间进行编码, 摄像头实时采集用户手部红外图像, 经由 OpenCV 实现的图像处理算法比较两帧图像, 获得结构光在手部移动的信息, 从而实现对包括深度方向在内的三个维度的平移、缩放和旋转动作等用户交互动作的解析, 并导入三维显示设备, 对三维显示的虚拟物体进行实时控制。利用商用 CMOS 摄像头和红外 LED 搭建了交互样机。实验结果证明, 该方案能以较低成本实现实时徒手三维交互。

**关键词** 测量; 信息显示; 三维交互; 红外结构光; 单摄像头; 实时交互

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0412005

## Three-Dimensional Display Interaction Device Based on Infrared Structured Light

Peng Yifan Tao Yiyang Yu Chao Li Haifeng Liu Xu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** Three-dimensional (3D) display has attracted widespread attention all over the world for its intuitive and natural performance. At the same time, three-dimensional interactive technology is also developed fast. A real-time interactive system based on infrared structured light and single-camera is carried out. Infrared structured light is projected onto interactive gesture as encoded procedure, and then infrared images of user's hand are captured by the camera in real time. An image processing algorithm implemented by OpenCV compares the difference between two consecutive images to obtain the movement information of structured light on user's hand. Therefore, user's interactive gestures including movement in three dimensions, zooming and rotating, can be recognized and then transported to three-dimensional display devices in real time. A prototype-equipment is proposed using off-the-shelf CMOS camera and infrared LED. Experimental results show that three-dimensional freehanded interaction can be realized by this approach in low cost.

**Key words** measurement; information display; three-dimensional interaction; infrared structured light; single-camera; real-time interaction

**OCIS codes** 150.6910; 230.1950; 100.5010

## 1 引 言

随着三维(3D)显示技术迅猛发展,人们对三维虚拟场景下的交互诉求愈加迫切<sup>[1~3]</sup>。与二维显示系统的交互不同(该交互形式通常只需3个自由度),三维空间的交互通常要求6个自由度,即 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的平移以及围绕3个轴的旋转。从早期使用键盘等非直观式控制,到后来使用轻便一些的辅助设备如手

套等进行交互<sup>[4]</sup>,人们都没有享受到解放双手后自由、直观的交互体验。于是,基于手势的徒手交互应运而生。光学和图形学领域对三维手势交互的研究基本都利用了多摄像头的立体视觉,模仿人眼的双目视觉原理从两个方向对手部进行拍摄。目前该方法已经日臻成熟,许多研究者都开发出了能够实时得到交互者手部空间姿态的交互系统<sup>[4~9]</sup>。然而这些研

收稿日期: 2012-11-01; 收到修改稿日期: 2012-12-11

基金项目: 国家 863 计划(2012AA011902)和国家自然科学基金(61177015)资助课题。

作者简介: 彭祎帆(1987—),男,硕士研究生,主要从事三维显示与三维测量等方面的研究。

E-mail: zjuhuayu@gmail.com

导师简介: 李海峰(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光电显示、光学与光电子薄膜以及光学测量等方面的研究。

E-mail: lihaifeng@zju.edu.cn(通信联系人)

究依然存在不足。首先,双摄像机需要强大的运算处理能力,处理速度慢,系统成本高。其次,很多系统都是使用复合结构光探测手部的空间姿态,对可见光下的彩色图像进行处理<sup>[10]</sup>(使用肤色识别技术检测出人手),这对环境照明条件提出了较高的要求。现有基于单摄像机的计算视觉追踪技术将手指图像的宽度与空间距离相对应的方法并不精确,而且不易实现双手同时交互。因此,使用红外光源投影、单摄像机拍摄的徒手交互设计方案开始进入人们的视野。

东京大学的 Takeoka 等<sup>[11]</sup>开发出 Z-touch 交互系统,使用一台高速摄像机探测接近屏幕的手指在所设三层激光层中的角度以及到屏幕的距离,再通过特定的算法对之前拍摄的位置进行匹配,即可组成五根手指在空间中的位置。类似技术提供了一种很好的解决方案,然而对于现有三维显示设备而言,过高的硬件成本和复杂的交互算法影响了交互装置与显示设备的集成化空间。

结构光投影(SLI)<sup>[12~14]</sup>被广泛用于三维传感和三维测量领域中。人们提出了各种不同的结构光编码与解码方式来获取三维形貌,然而利用结构光投影来实时获取空间三维交互的文献报道相对较少。事实上,现有三维显示设备的交互需求并不要求很高的精度,因此利用结构光投影技术配合有效的图像处理算法以实时获取空间相对位移坐标提供了一种思路。韩国圆光大学的研究者曾使用采用了 Lighting code 技术的深度摄像机初步实现了三维手势的实时监测<sup>[15]</sup>,但该技术的纵深精度有限,每次均需要存储和处理空间绝对坐标,其匹配算法较复杂,而从三维显示的现实交互需求而言,只需要将相对坐标反馈给显示设备即可。

本文针对现有三维显示设备的显示能力及实际需求,提出了一种基于红外结构光的单摄像头三维

手势交互装置,设计了更符合日常习惯的交互手势,力求以更简单的光路结构和算法实现快速交互功能。系统投射红外结构光至交互手部,图像采集设备实时检测与跟踪手部条纹变化情况,获取相对坐标信息,通过程序运算转换为交互指令反馈给三维显示设备,实现人机交互。详细分析了结构光投射系统中光栅参数的设计要求,介绍了手势识别与交互算法,利用商用 CMOS 摄像头和红外 LED 制作了交互装置样机,并对装置的交互效果和准确度进行了量化的评测分析。

## 2 交互装置与工作原理

### 2.1 硬件系统与交互原理

基于红外结构光的三维显示用交互装置硬件结构如图 1 所示,主体包括两组分别设置于三维显示空间不同侧的红外光源和带有红外滤光片的图像采集设备。借鉴传统的光学轮廓测量技术,一组红外光源前方设置有特定结构的图样,如具有周期性排布横条纹的光栅,则红外光源发出的光线经过光栅的调制,形成了纵向亮暗相间的空间分布,当投射到平面物体(如手部)时,由于皮肤对红外光的反射就在平面上形成亮暗相间的条纹。另一组红外光源为图像采集设备提供参考照明,红外光源发出的光线直接照亮交互区域,以便图像采集设备快速区分手部轮廓和背景,降低了软件上实时运算的复杂度。为了提高手部识别前景的对比度,该装置采用参考光源和结构光光源交替点亮的方式,使用高帧频的图像采集设备配合相应算法即可。由于红外光源投射结构光方向与水平方向有一定夹角,当手部前后移动时,其上的图案也将相对图像采集设备上下移动,相当于对空间进行了光学编码。基于该基本

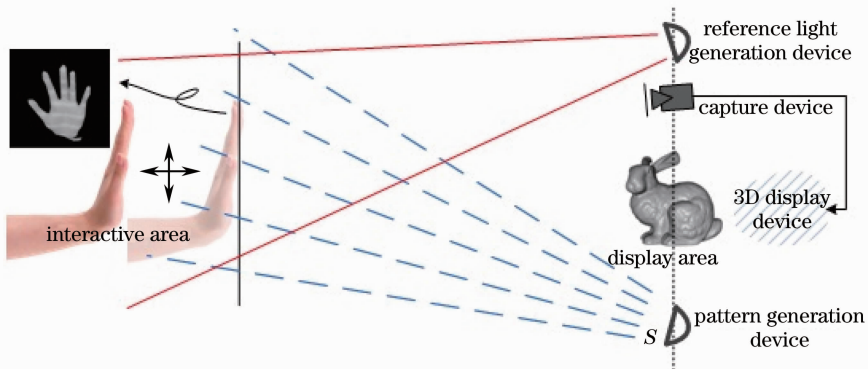


图 1 三维显示用交互装置硬件结构

Fig. 1 Hardware structure of 3D display interactive system

原理,跟踪手部上的图案并采用基于 OpenCV 的快速检测与跟踪算法,就可以根据其移动情况判断手部的移动情况,相当于解码。手部在其他维度内的移动可通过采集由红外光源照明的图像,对图像中的前景目标(手部)进行跟踪,从而得到其运动信息。更多的交互操作也可通过跟踪不同手势下的图像变化信息而实现。由于此时获取的是相对坐标,而非整个空间的绝对坐标,因此对交互手部空间位置判定的精确度要求大大降低,进而大大简化了硬件和软件系统。

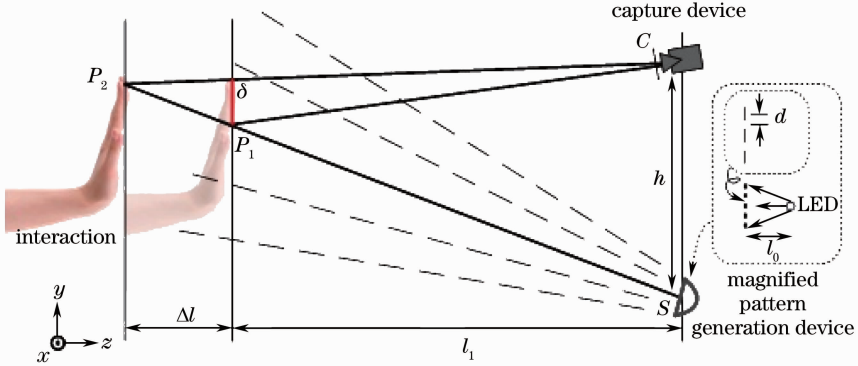


图 2 基于结构光的交互原理示意图

Fig. 2 Illustration of interactive principle based on structured light

为了使空间距离的计算更加准确,希望有尽量多的条纹被检测到。理论情况下超过两条亮条纹被检测到即可实现对交互操作的跟踪和实时计算,但如果可见的条纹数量较少,当有偶然事件使部分条纹产生抖动或者消失时,系统将产生很大误差。为尽可能避免这类问题,要求可检测到的亮条纹数量大于三条,即限定

$$3\omega < h_1, \quad (2)$$

式中  $h_1$  表示手部的纵向长度。

然而也并不是条纹越多越利于采集检测,因为条纹过密将导致手部前后移动时结构光图案相对于其自身间隔上下移动过于剧烈,图像处理程序不能准确得到两帧图像间条纹的移动情况,从而产生误判。

为理论推导光栅参数与交互要求之间的关系,假设某一时刻投影结构光的红外光源发出的一条光线  $SP_1$  投射的亮条纹被图像采集设备 C 捕获识别,下一时刻手部交互在深度上移动了  $\Delta l$  的距离,光线  $SP_1$  投射的亮条纹移动至  $P_2$  处并被图像采集设备跟踪捕获。再设定三维显示设备的成像区域高为  $h$ ,即图像采集设备到结构光投射装置的垂直距离。

根据相似三角形关系,可以得到

## 2.2 交互装置参数分析

如图 2 所示,以明暗间隔排布的光栅图样结构为例,设  $\omega$  为投射在手部的亮条纹间隔,交互时手部离图像采集设备和结构光投射装置所在平面的距离为  $l_1$ ,则

$$\omega = \frac{d(l_0 + l_1)}{l_0}, \quad (1)$$

式中  $d$  表示光栅常数,即相邻亮透光区域的间距, $l_0$  表示红外投射装置中 LED 光源距光栅图样的距离。

$$\frac{\delta}{h} = \frac{\Delta l}{l_1 + \Delta l}, \quad (3)$$

式中  $\delta$  为结构光条纹移动的距离。

设定人体手部自然前后移动的最大速度为  $v$ ,图像采集设备帧频为  $F$ ,图像采集设备各帧图像间能采集的手部最大移动距离为

$$\Delta l_{\max} = \frac{v}{F}, \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式中,则可以得到能采集的条纹纵向移动的最大距离  $\delta'$ ,要求在规定的速度范围与交互位置内,每两帧图像之间结构光图案移动距离都不超过条纹间距的一半,即

$$\delta' = \frac{v \cdot h}{v + F \cdot l_1}, \quad (5)$$

$$\omega/2 > \delta', \quad (6)$$

否则,系统将产生误判(如将手部的移动方向判定为反方向等)。

根据上述(2)、(6)式表征的条件,结合图 2 给出的原理图,可以推导出在要求交互条件下光栅常数  $d$  的可取值范围。

## 2.3 工作原理与算法分析

### 2.3.1 手势检测与识别

由于采用的图像采集设备通常含有三通道信

息,为加快处理速度,先将红外光照明下拍摄到的三通道图像转换为单通道图像。由于手部离光源最近,且手部皮肤反射红外光能力强于较远距离的头部或衣物的反射光,当加入参考光源后,很容易采用阈值化操作将图像的前景(手部)与背景分离,考虑到此时的二值化图像存在许多噪声和误判,利用图形学“开运算”和“闭运算”进行两步去噪,为随后的手部轮廓检测节约时间。利用 cvFindNextContour 函数对图像中所有轮廓进行快速轮廓检测,并设定阈值以删除周长较小的轮廓,而保留周长较大的轮廓,即识别交互指令。

### 2.3.2 三维交互算法分析

对平行于屏幕的  $xy$  平面内的交互,在得到手部轮廓的情况下,很容易找到轮廓的几何中心并进行坐标跟踪,从而得到手部在  $xy$  二维平面内的移动情况。然而,由于人手存在自然抖动,且环境光对图像的细微影响及图像处理对手部轮廓的判断并不完全相同,几何中心在实际应用中会因图像边缘的抖动而产生较大的波动,导致两帧图像的几何中心

发生较大偏差。为此,该系统引入计算轮廓矩中心的算法来进行手势跟踪。轮廓矩<sup>[16]</sup>是表征一个轮廓特征的重要方式,其实质是对轮廓内所有的点进行积分运算而得到的一个粗略特征,所得到中心点不是轮廓的几何中心,而是考虑了轮廓分布的轮廓矩中心,该点坐标相较于轮廓几何中心来说具有较好的稳定性。

对于手部在深度方向的移动,借助于条纹的纵向相对位移运动给出判断。将手势检测与识别得到的轮廓“盖”到原灰度图像上,即使用 OpenCV 对轮廓图像与原灰度图像[如图 3(a)所示]进行“按位与”操作,得到保留了结构光条纹图案的手部图像,如图 3(b)所示。为了得到条纹的亮度变化信息,对图 3(b)的每一行非零像素取平均值,得到一组像素平均亮度对纵坐标的曲线,如图 3(c)所示。为保证可靠性,先用中值滤波的方法使曲线趋于平滑,并剔除抖动太大的噪点。最终,曲线上可以获取几个极大值,如图 3(d)所示,这些极大值点都对应了结构光图案的亮条纹中心,而后通过程序准确地找到这些极大点。

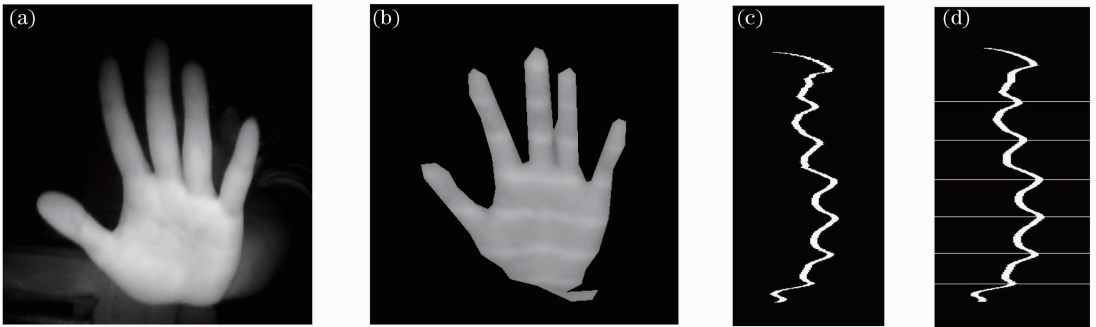


图 3 交互状态获取手部图样信息。(a)拍摄到的手部图像;(b)保留了结构光条纹图案的手部图像;(c)实时提取的条纹亮度分布曲线;(d)提取亮度分布曲线极大值

Fig. 3 Illustration of captured pattern image processing. (a) Captured image of hand gesture; (b) captured pattern image of structured light on hand gesture; (c) real-time luminance distribution of pattern image extracted; (d) maximum value extraction of luminance distribution (illustrated by the lines)

为了跟踪这些极大点坐标的相对变化,需要对每两帧之间的极大点进行匹配,两帧图像间匹配成功的点将视为同一点,二者相减即可得知这一条亮条纹的相对移动情况。这一算法可以总结为

$$d_{ai} = \min(|Y_{ai} - Y_{bj}|), \quad (7)$$

$$|D_{ai}| = \begin{cases} d_{ai}, & d_{ai} < d_T \\ \infty, & \text{else} \end{cases}, \quad (8)$$

式中  $Y_{ai}$  表示第  $a$  帧第  $i$  个极大点的纵坐标; $Y_{bj}$  表示第  $b(b = a + 1)$  帧第  $j$  个极大点的纵坐标; $d_{ai}$  表示条纹的移动距离,若为无穷表示不存在; $d_T$  表示条纹位移的最大理论值。

用上述方法对前一帧的每一个极大点坐标进行判断,然后对存在的条纹移动距离进行有符号的取平均值,最后得到的就是图案上下移动的估计值。这一结果即可转换为手部的深度方向相对位移值并反馈给三维显示设备。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 三维显示交互装置

根据上述原理,以浙江大学开发的拼接光场三维显示设备的显示能力为参考<sup>[17~19]</sup>,结合理论及实际工艺要求,再考虑到实际光源宽度对亮条纹亮度分

布的影响,实验上将结构光投影装置的具体参数设为:与红外 LED 光源的距离  $l_0 = 8 \text{ cm}$ ,透光部分宽度  $d_1 = 1 \text{ mm}$ ,遮光部分宽度  $d_2 = 5 \text{ mm}$ 。设定三维显示区域的高度  $h = 30 \text{ cm}$ ,手部离图像采集设备所在平面的距离  $l_1 = 40 \sim 80 \text{ cm}$ ,即为最佳交互距离;假定人手部的自然移动速度  $v = 0.1 \sim 0.15 \text{ m/s}$ 。

对于图像采集设备,使用标称帧频  $30 \text{ frame/s}$ ,动态分辨率为  $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$  的商用 CMOS 摄像头,这种摄像头在加装红外滤光片的红外光照明情况下可以达到实测帧频  $15 \text{ frame/s}$ ,初步满足交互需求。红外滤光片的特性是  $800 \sim 1100 \text{ nm}$  高透,  $400 \sim 760 \text{ nm}$  截止,与使用的发光主波长为  $850 \text{ nm}$  的红外 LED 光源相匹配,如图 4 所示。

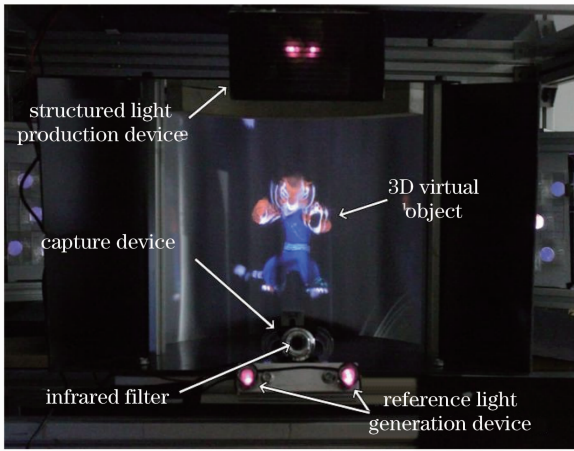


图 4 三维显示用交互装置实物图

Fig. 4 Prototype of 3D display interactive device

### 3.2 深度方向移动测量值线性度分析

该交互方案旨在实现三维显示中  $z$  方向,即深度方向的交互,而其他交互功能(如旋转及缩放)可基于深度变化的测量实现。为了测试系统计算出的深度移动量与实际空间手部真实的移动量之间是否存在一定范围内存在良好的线性度,设计了一个实验。如图 5 所示,在一个水平移动测量台的滑块上固定了手部造型作为交互平面,通过移动滑块可以得到不同实际距离对应的测量值。在图 5 中以平台为基准标定了空间坐标轴,前后移动为沿  $z$  轴移动。

图 6 为被测目标沿深度方向( $z$  轴)移动时,实际移动量(以  $\text{cm}$  为单位)与通过图像处理计算得到的移动量(实际上测得的是条纹图案上下移动的改变量)的对应关系。

从图 6 中可以看到,实际量与被测量的关系基本上呈正相关,但并不是完全的线性关系。这主要是因为不同的位置,能够投影到手部的光线不同。每条光线因为方向不同,因此投射的条纹对于同样

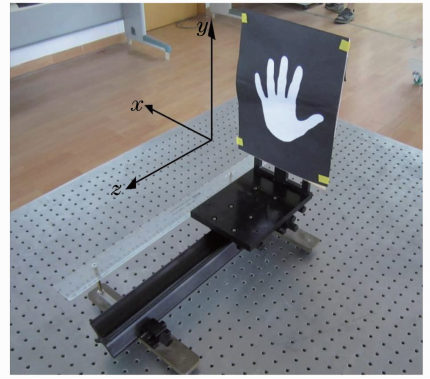


图 5 用于深度方向位移的线性度测试装置图

Fig. 5 Testing device of moving linearity in depth direction

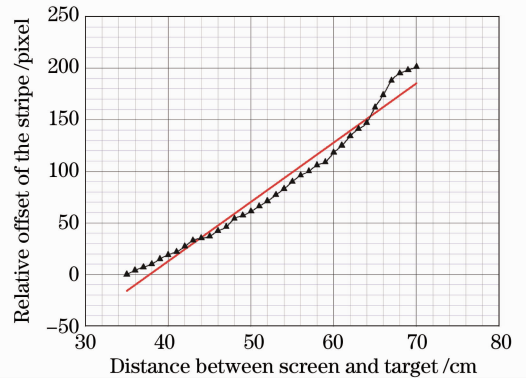


图 6 深度方向位移线性度分析

Fig. 6 Analysis of moving linearity in depth direction

的  $z$  轴位移,会产生不同的  $y$  方向偏移,人的手部在交互过程中接收到不同的光线,取平均值后,就会得到不同的  $z$  轴和  $y$  轴的位移关系。但这个误差并不影响系统对交互手势的判断,而且可以通过设计不同的光栅常数以及合理地减小小光栅常数,使这个误差进一步减小。于是,设计了实验来测量沿  $z$  轴移动的检测误差。具体方法是在距离屏幕  $35 \sim 75 \text{ cm}$  的范围内,每隔  $5 \text{ cm}$  取一个位置,将被测目标固定在选定位置,对被测目标的实时测量结果进行观察记录,找到所有测量结果的最大波动范围。通过这个实验,得出本系统对  $z$  轴移动量测量的最大误差为  $\pm 4 \text{ pixel}$ ,尚未满足精确测量的要求,但以较低的硬件成本和计算复杂度满足了现有三维显示设备的交互需求。接下来的研究工作将侧重对光栅图样的研究设计以提升深度方向交互精度。

### 3.3 交互设计与实际效果

基于对现有三维显示系统成像能力的综合考量,交互装置需要实现对三维场景空间三个维度的位移、旋转、缩放,并且具备判定交互起始和终止的能力。为此,设计以下交互手势及功能,实现空间三

维显示中的快速交互。首先是五指伸展,即手势“五”;其次是只伸食指,即手势“一”;最后是手部握拳状,即手势“零”。当交互者使用手势“五”时,系统实时采集手部的运动状态,如前进、后退、左右移动等,并且系统支持单手或双手交互,自动判定识别左右手,通过相应图像数据以控制一到两个虚拟三维物体的空间交互。手势“一”仅在双手交互使用,系统实时采集两手之间的水平距离及两手的前后距离,可对虚拟三维物体进行缩放或旋转操作。手势“零”的功能在于判定交互起始和终止,实现对虚拟三维物体按需操作。

对于不同交互手势的判定,使用图形学中“凸包”与“凸缺陷”的检测方式,当凸包(指尖数)为5个

而凸缺陷(指缝数)恰为4个时,可以判定此时的轮廓为手势“五”。手势“一”和“零”可通过相似检测方法进行识别,同样通过拇指与食指间凸缺陷的特点判定左手和右手,以支持双手交互控制功能。

为方便说明,设定显示两个虚拟物体,分别为绿色正方形与红色圆形。交互者可以使用左手控制绿色方块,右手控制红色圆形的位臵,如图7(a)~(c)分别表示通过手势“五”控制三维物体在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 3个维度平移。另外,交互者可以使用双手手势“一”,对选定的物体进行放大、缩小操作,如图7(d),(e)所示。为了体现旋转操作,这里使用改变选定物体的色彩深度表征旋转交互,如图7(f),(g)所示。

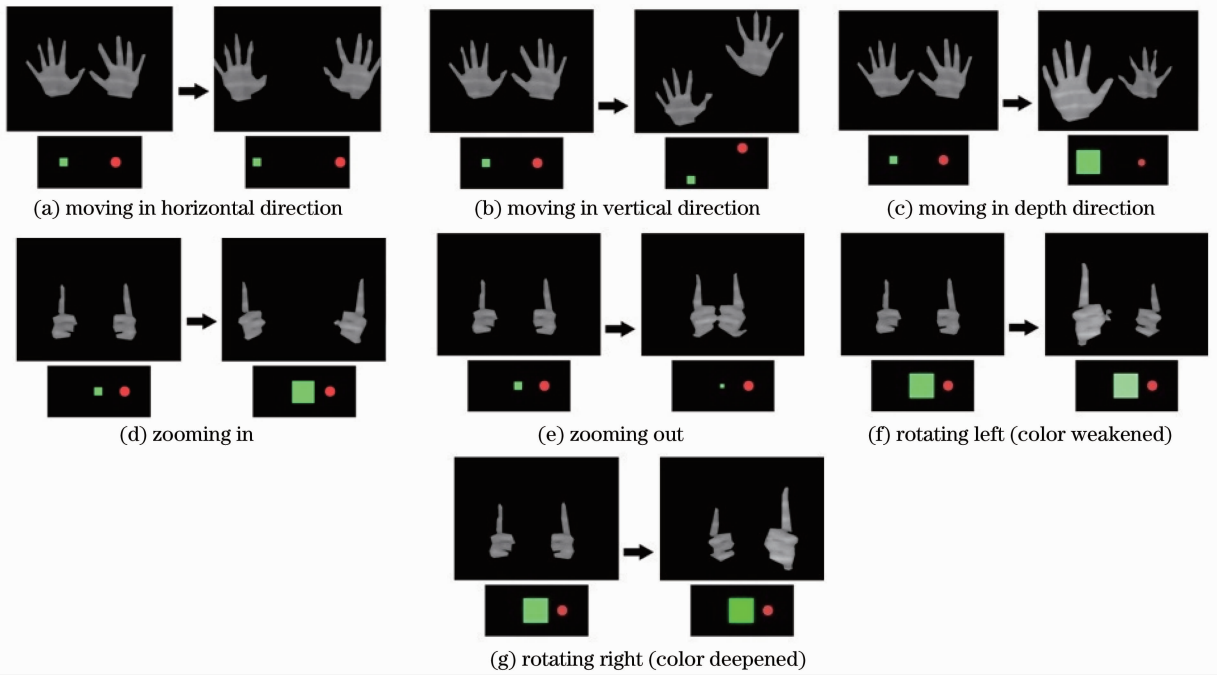


图7 交互功能示意图

Fig. 7 Illustration of interaction movements

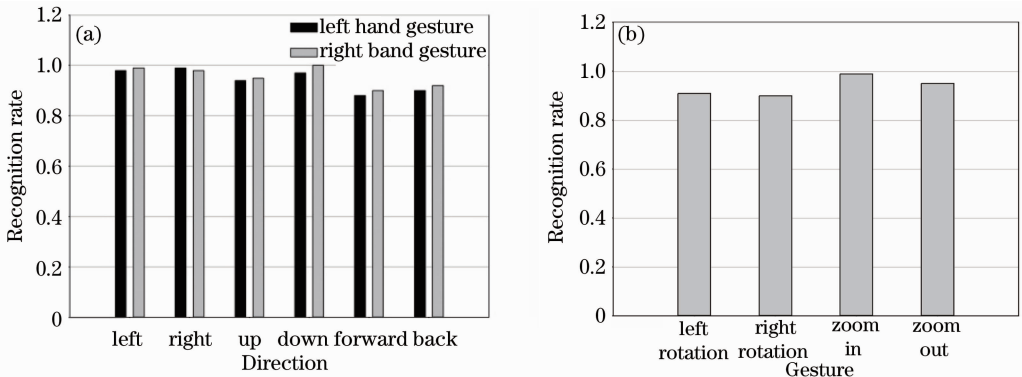


图8 交互样机测试手势识别成功率统计。(a)手势“五”;(b)手势“一”

Fig. 8 Results of gesture recognition of interactive prototype. (a) Gesture “five”; (b) gesture “one”

为了评估本装置对交互手势识别和反馈的准确度,邀请了10名体验者试用交互装置样机。需要说明的是,这些体验者均是首次接触三维交互,且事先对于该系统的原理验证和设计无过多了解。每名体验者被要求完成指定交互动作各10次,将系统识别成功并做出响应的次数进行统计,图8(a),(b)为统计结果,横坐标为交互的种类,纵坐标为操作成功率。从统计结果来看,各项手势识别的成功率都达到90%以上。其中,手势深度方向位移的成功率普遍稍低,但尚处于可接受范围。

## 4 结 论

介绍了一种三维显示用手势交互装置,采用红外结构光投射到人手部进行编码,单摄像头作为图像采集设备。该装置除了能获取通常人机交互的二维平面位移信息外,亦可实现在深度方向的交互功能,满足现有裸眼三维显示设备的成像能力和实际需求。首先对手部的轮廓与背景进行分离,再根据手部的轮廓估算当前的手势。由于人手部在深度方向移动时,投射到手部的结构光图案会发生相对运动,对手部的结构光图案进行跟踪计算可得到其位移的相对坐标。实验结果表明,样机装置可以实现三个维度的平移、旋转和缩放等实时交互功能,并且对各操作的识别准确度基本达到90%以上。相对于现有三维交互方法而言,该方法在降低系统硬件要求和软件计算复杂度的同时,契合了现有三维显示设备交互需求,为三维交互和三维显示设备的集成化提供了新的思路。下一步的工作是实现软件算法的进一步优化和硬件结构的改进以提高实时性,同时研究双结构光投影下不同图样的切换,以实现更多交互手势的识别计算。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Qionghua, Wang Aihong. Survey on stereoscopic three-dimensional display [J]. *J. Computer Application*, 2010, **30**(3): 579~588  
王琼华, 王爱红. 三维立体显示综述 [J]. 计算及应用, 2010, **30**(3): 579~588
- 2 Zang Xiaojun, Jiang Zhiguo, Wang Yongtian *et al.*. True three-dimension display based interaction technology [J]. *China Science Paper*, 2012, **7**(1): 1~6  
臧晓军, 姜志国, 王涌天等. 真三维显示器的交互技术 [J]. 中国科技论文, 2012, **7**(1): 1~6
- 3 Li Na. Research on Human Pose Estimation with Monocular Videos for HCI Applications [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. 1~2  
李娜. 面向人机交互的单目视频三维人体姿态估计研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008. 1~2
- 4 Junichi Ouchi, Hiroyuki Kamei, Kengo Kikuta. Development of 128-directional 3D display system [C]. *SPIE*, 2006, **6392**: 639201
- 5 Victor Adrian Prisacariu, Ian Reid. Robust 3D hand tracking for human computer interaction [C]. 2011 IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition and Workshops, 2011. 368~375
- 6 R. Y. Wang, S. Paris, Jovan Popović. 6D hands: markerless hand tracking for computer aided design [C]. Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 2011. 549~557
- 7 Soumita Ghosh, Jianmin Zheng, Wenyu Chen *et al.*. Real-time 3D markerless multiple hand detection and tracking for human computer interaction applications [C]. ACM SIGGRAPH Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Application to Industry, 2010. 323~330
- 8 Corey Manders, Farzam Farbiz, Tang Ka Yin. A gesture control system for intuitive 3D interaction with virtual objects [J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2010, **21**(2): 117~129
- 9 Shi Junhao, Zhang Mingmin, Pan Zhigeng. A real-time bimanual 3D interaction method based on bare-hand tracking [C]. Proceedings of the 2011 ACM Multimedia Conference and Co-Located Workshops, 2011. 1073~1076
- 10 Pan Wenping, Shen Chunlin, Zhang Zhaoxing *et al.*. Interactive volumetric three-dimensional display based on dynamic hand gesture control [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(12): 88~95  
潘文平, 沈春林, 张赵行等. 基于动态手势控制的交互式体三维显示 [J]. 光电工程, 2010, **37**(12): 88~95
- 11 Yoshiki Takeoka, Takashi Miyaki, Jun Rekimoto. Z-touch: an infrastructure for 3D gesture interaction in the proximity of tabletop surfaces [C]. ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, 2010. 91~94
- 12 Tang Yan, Chen Wenjing. Neural network applied to three-dimensional measurement of complex objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1435~1439  
唐燕, 陈文静. 应用神经网络的复杂物体三维测量 [J]. 光学学报, 2007, **27**(8): 1435~1439
- 13 Chun Guan, Laurence G. Hassebrook, Daniel L. Lau *et al.*. Near-infrared composite pattern projection for continuous motion hand-computer interaction [J]. *J. Visual Communication and Image Representation*, 2007, **18**(2): 141~150
- 14 Hou Zhiling, Su Xianyu, Zhang Qican. 3D shape compression based on virtual structural light encoding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0510003  
侯志凌, 苏显渝, 张启灿. 三维面形信息压缩的虚拟结构光编码算法 [J]. 光学学报, 2011, **31**(5): 0510003
- 15 Liu Di, Yao Zhenning, Li Haifeng *et al.*. Structured light acquisition system based on waveband separation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0612003  
柳笛, 姚振宁, 李海峰等. 基于波长分离的结构光采集系统 [J]. 光学学报, 2012, **32**(6): 0612003
- 16 Guan-Feng He, Sun-Kyung Kang, Won-Chang Song. Real-time gesture recognition using 3D depth camera [C]. 2011 IEEE 2nd International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS), 2011. 187~190
- 17 Liu Yishu, Yang Lihua, Sun Qian. Contour-based moment invariants and their application to the recognition of object shapes [J]. *J. Image and Graphics*, 2004, **9**(3): 308~310  
刘亦书, 杨力华, 孙倩. 轮廓矩不变量及其在物体形状识别中的应用 [J]. 中国图象图形学报, 2004, **9**(3): 308~310
- 18 Peng Yifan, Li Haifeng, Zhong Qin *et al.*. Liquid-crystal-display-based touchable light field three-dimensional display using display-capture mapping calibration [J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(25): 6014~6019
- 19 Shuai Li, Haifeng Li, Zhengrong Zheng *et al.*. Full-parallax three-dimensional display using new directional diffuser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(8): 081202