

# 基于指尖触控的互动投影系统

何 明 程 俊

(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

**摘 要** 随着人机交互技术的不断发展, 互动投影技术的应用逐渐广泛。该技术通过摄像机等传感器技术感知周围场景动态并结合投影的显示功能实现交互的方式, 如增强现实、结构光编码、三维重建等。基于触控的互动投影技术在未来的嵌入式人机交互系统中具有广阔的前景。文章基于单目摄像机与投影仪系统实现能够在任意平面徒手触摸的交互。系统的功能主要通过前景区域分割、指尖点的定位以及触摸检测三个步骤来实现。与目前相关领域的研究文献进行的对比实验证明, 所提算法在稳定性、准确性以及实时性等方面具有一定优势。

**关键词** 动投影系统; 显著性检测; 前景分割; 结构光编码; 触摸检测

**中图分类号** TG 156 **文献标志码** A

## Fingertip Touch-based Interactive Projection System

HE Ming CHENG Jun

(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

**Abstract** Recently, with the development of human-computer interaction, interactive projection technologies have been used more and more extensively, which is able to perceive the ambient behavior by using additional sensors and corresponding projected contents for interacting, such as augmented reality, structured light coding, and 3D reconstruction. Touch-sensitive interactive projection has achieved broad prospects on embedded human-machine system in the future. This paper aims at realizing bare-hand touch interaction on arbitrary surfaces by means of a camera and a projector. The performance of this system can be achieved through three steps, foreground extraction, fingertip detection and touch detection. Extensive experiments are presented to show the accurate and robust performance of our approach.

**Keywords** interactive projection system; saliency detection; foreground extraction; structured light coding; touch detection

收稿日期: 2015-07-28 修回日期: 2015-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(6140051238); 广东省引进科研创新团队项目(201001D0104648280); 深圳市基础研究项目(JCYJ20130402113127502, JCYJ20140417113430736, JCYJ20140901003939001)

作者简介: 何明, 硕士研究生, 研究方向为计算机视觉与人机交互; 程俊(通讯作者), 博士, 研究员, 博士研究生导师, 研究方向为计算机视觉、人机交互和机器人, E-mail: jun.cheng@siat.ac.cn。

## 1 引言

随着微型投影仪的出现, 关于投影仪摄像机系统的研究在当前的人机交互领域中备受关注。由于摄像机和投影仪系统硬件设备的便携性, 该技术给互动投影在嵌入式移动设备上的应用带来了很大的机遇<sup>[1,2]</sup>。投影技术可以将任意的平面作为显示屏, 而且显示尺寸不受系统硬件设备体积的限制。目前市场上的便携式投影仪可以做到十分精致, 拳头般大小的投影仪却能投射出 100 多英寸的显示画面。这种传统的投影技术只是作为一种显示功能, 没有任何的输入设备进行控制交互。事实上, 我们可以将投影仪作为可控的输出显示功能设备, 通过辅助的传感器, 如摄像机、红外光检测装置等设备来获取场景环境状态以及用户的行为动作, 从而实现用户与设备之间的交互。这种新一代的人机交互方式, 有效地解决了目前触摸屏技术中显示画面尺寸与便携性的矛盾, 能够将任意投影的平面转变成为互动投影式的触摸屏。因此, 如何基于计算机视觉的方法将投影仪摄像机系统用于检测用户的指尖触摸点位置来实现相应的投影交互操作, 是互动投影人机交互技术的关键<sup>[3]</sup>。

早在 CES2010 国际消费类电子产品展览会中, 英国的 Light Blue Optics 公司推出的一款光学投影产品“Light Touch”就吸引了众人的目光: 这款产品将投影仪与红外感应技术相结合, 将任意平面经过投影变成一块触摸屏, 可以应用在如商场、办公、会议等场合。微软公司也曾推出“Mobile Surface”的人机交互系统, 通过高速摄像头对激光投影仪投射的平行扫描线进行记录并获取场景物体的三维信息, 其精度可以达到厘米级别。但这些技术目前还不够成熟, 传感器设备较为昂贵, 仍难以普遍推广。在国内, 易视科技推出的 FPBoard 是一款便携式的指尖触控投影系统。该技术结合投影仪与激光传感器设备,

可以将任意的规则平面变成可触摸的显示屏, 并且还支持其他不透明物体的识别以及多点触控。但由于该产品的触摸检测需要安装激光模块, 系统的硬件成本较高。腾讯公司联合中国科学院于 2012 年研发出一款微型互动投影, 它能够捕捉触控笔或激光笔在屏幕上发出的红外光线, 根据光点的位置对投影画面执行相应的操控。

随着计算机视觉技术的不断成熟, 人们发现利用视觉的方法可以有效解决很多物体检测、环境监控等复杂的问题。计算机通过摄像镜头这个“眼睛”去“看”懂外界环境, 再与投影图像结合的主动视觉技术在不同领域的应用十分广泛, 包括结构光三维扫描与重建、虚拟现实、增强现实以及触控交互等<sup>[4,5]</sup>。而在触控投影方面, 由于投影画面背景的复杂性与环境光照变化的多样性, 利用计算机视觉对前景物体的检测与触摸识别仍存在许多困难与瓶颈<sup>[6,7]</sup>。微软研究院 Wilson<sup>[8]</sup>基于深度摄像机搭建了 Depth Touch 系统, 通过检测用户触摸点的位置深度信息来检测触摸桌面的动作。

本文提出了基于单目摄像机与投影仪系统能够在任意平面徒手触摸的交互系统, 包括前景区域分割、指尖点的定位以及触摸检测三个部分。结合投影图像与摄像机图像反射率对比的显著性检测方法, 并融合均值漂移实现了图像前景手臂区域的分割; 对前景轮廓的边缘进行检测, 并对边缘点序列进行曲率计算, 根据曲率极值与轮廓重心的距离约束条件来定位指尖点位置; 基于空间结构光编码测量技术的思想提出了自适应编码的方法, 通过嵌入在帧间投影图像中的自适应编码, 判断指尖点与投影平面的空间距离, 实现触摸检测。

## 2 系统框架与算法原理

### 2.1 系统框架

本文采用基于 DLP (Digital Light Procession)

技术的便携式投影仪与单个普通可见光摄像机固定在一起组成的互动投影系统，通过投影仪将背景画面投射在任意的规则平面上，如白纸、墙壁、桌面等，由摄像机捕捉用户在投影屏幕上的交互手势图像，经数据接口传输给计算机进行处理，对前景手臂区域分割提取并检测指尖点的位置，最后采用自适应结构光编码的方法检测指尖触摸投影平面的操作，并由计算机执行相应的操控，实现触控的投影交互方式。

## 2.2 算法流程

本文基于指尖触控的互动投影系统算法原理框架流程如图 1 所示。通过计算机视觉的方法对指尖触摸进行检测，主要可以分为前景手臂区域检测、指尖点定位以及触摸检测三大部分。

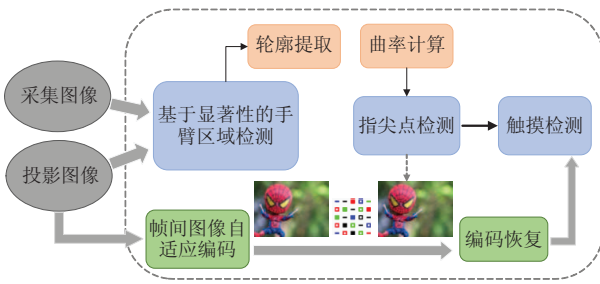


图 1 系统算法流程图

Fig. 1 Flowchart of algorithm

## 2.3 前景提取原理

为了检测指尖点触摸的位置，系统需要对投影背景上的前景手臂区域进行提取分割。在互动投影人机交互系统中，由于投影背景画面的多样性，传统的图像分割方法比较难以准确实现前景的手臂区域提取。本文根据手臂皮肤对光照的反射率与投影屏幕物体表面的反射率差异性来检测前景区域的显著性特征。假设周围环境光的影响为  $Q$ ，投影平面物体的表面反射率为  $A$ ，摄像机在像素级的颜色转换函数为  $C$ ，视觉回馈图像的亮度值为  $E$ ，则有<sup>[9]</sup>：

$$E = C \times A \times Q \quad (1)$$

如果投影屏幕上没有任何的前景物体，则摄

像机采集图像上对应点的像素值  $I$  应该与  $E$  相等；否则，当投影屏幕上存在交互的投影物体，如用户的手臂，且该物体表面的反射率为  $\tilde{A}$ ，则对应点的像素值： $I = C \times \tilde{A} \times Q$ 。我们可以通过计算像素  $(x, y)$  在颜色通道  $c \in (R, G, B)$  的反射率比值来估计不同物体表面反射率的差异显著性。

$$a_{[x,y],c} = \frac{E_{[x,y],c}}{I_{[x,y],c}} \quad (2)$$

由于前景物体表面的反射率与投影平面的反射率差异比较大，因此通过上式的反射率对比可以得到前景物体区域与背景区域差别比较明显的反射率比值  $a$ 。投影图像与实际摄像机采集的图像的颜色转换模型可以用近似线性模型<sup>[10,11]</sup>，因此不妨对公式(2)中的  $I$  用投影图像的  $P$  来代替，并对像素  $(x, y)$  中所有颜色通道的反射率比值进行累加，得到：

$$S_{[x,y]} = \sum_c \frac{E_{[x,y],c}}{P_{[x,y],c}} \quad (3)$$

通过对所有的颜色通道上的反射率比值进行累加后，可以发现前景物体区域与背景之间的差异已经比较明显。为了更好地加强前景手臂区域的显著性，定义摄像机图像上每个像素的显著性由以下公式表示：

$$S(i) = \sum_{m=1}^W \sum_{n=1}^H D(s_i, \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s_j) \quad (4)$$

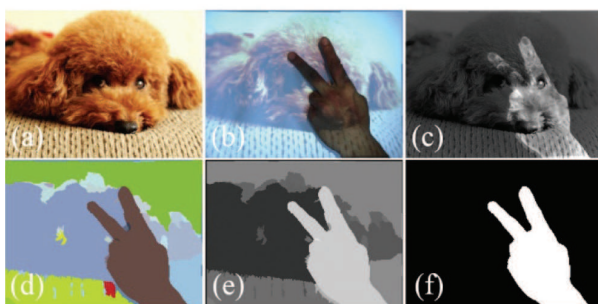
其中，函数  $D$  是反射率比在 RGB 颜色通道上图像均值的欧氏距离； $W$  与  $H$  分别表示摄像机图像的宽度与高度分辨率； $N$  是图像中所有像素的个数。

为了消除由于投影仪摄像机不同设备之间的光谱响应的差异导致显著性检测某些细节纹理被增强的问题，采用了 Mean-shift 算法<sup>[12,13]</sup>对摄像机图像进行粗糙的分割与平滑抽象。均值漂移是一种有效的统计迭代算法，基于密度梯度上升的非参数方法，通过不断迭代更新运算寻找特征空间中的收敛位置，在计算机视觉领域上经常应用

于目标跟踪与图像分割。在图像分割中均值漂移采用的多元核概率密度函数:

$$K_{h_s, h_r}(x) = \frac{C}{h_s^2 h_r^2} K\left(\left\|\frac{x^s - x_i^s}{h_s}\right\|^2\right) K\left(\left\|\frac{x^r - x_i^r}{h_r}\right\|^2\right) \quad (5)$$

其中,  $x^s$  与  $x^r$  分别为空间和颜色信息, 与中心点距离成反比;  $h_s$ 、 $h_r$  分别为坐标空间核与颜色空间核的带宽尺度, 是 mean-shift 在图像分割中重要的参数, 该参数的选择影响了图像分割的效果。本文采用的 mean-shift 的参数 ( $h_s, h_r, M$ ) 设置为 (5, 10, 20), 最终结果如图 2 所示。



(a) 投影背景图像; (b) 摄像机采集图像; (c) 基于反射率对比的显著性检测结果; (d) 均值漂移图像分割结果; (e) 显著性图与均值漂移分割的融合结果; (f) 最终前景分割结果

图 2 基于显著性检测的前景提取

Fig. 2 Results of foreground extraction based on saliency detection

经过 mean-shift 的图像分割抽象后, 摄像机采集图像的前景与背景的细节纹理均已被消除, 图像的像素点分类成  $M$  个不同的图像区域。系统算法通过融合显著性特征图以及 mean-shift 分割平滑细节后的图像来实现前景手臂区域的提取。

假设图像中像素点  $i$  的显著性值为  $S(i)$ , 该像素点在 mean-shift 图像分割中被分类到的区域为  $k$ , 且该区域  $k$  的平均显著性值为  $S(k)$ , 则像素点  $i$  被归类成前景或背景的决策函数由如下表示:

$$D_F(i) = \exp\left(-\frac{1}{\alpha \cdot S(i)}\right) + \exp\left(-\frac{1}{\beta \cdot S(k)}\right) \quad (6)$$

其中,  $\alpha$ 、 $\beta$  是像素点与区域模块的融合权值系数, 在本系统中分别为 30、10。融合后的结果如图 2(e) 所示。最后根据融合后的结果, 采用动态阈值的方法计算出最终的前景区域。

摄像头采集投影仪投射的画面时, 颜色、形状等都会发生变化, 一般的方法需要事先做摄像机投影仪几何、颜色等标定, 我们的方法能够对颜色变化有较强的适应能力, 不需要前期的颜色标定过程。

## 2.4 触摸检测

基于指尖触摸的互动投影系统需要对用户在投影仪平面上交互的指尖触摸进行检测, 指尖点的定位是准确判断触摸位置的基础。如图 3 所示, 本文的指尖点定位检测是基于曲率极值的方法来实现。首先, 对手臂区域分割后的前景基于 Canny 算子检测边缘轮廓点; 其次, 对所有的边缘序列点计算对应的曲率, 通过寻找曲率的极大值可以获取指尖位置的候选点; 再次, 在对前景轮廓提取完曲率的极大值点后, 我们发现手掌的轮廓曲率较大的不仅包含指尖点的位置, 还有手指之间夹缝的峰谷点, 但可以根据候选点与手掌区域轮廓的重心距离来排除; 最后, 将每个候选点距离较近的点分类成一个组合, 称为同一个手指上的候选点, 而距离较大的分类在不同的组, 一个手掌区域总共可以分成五个组, 每个组的点取平均值作为最终的指尖点返回。

触摸检测的实现是基于一种自适应结构光编码, 系统根据前面检测到的用户前景指尖点位置后, 将结构光的图案编码投射在指尖点附近的小领域范围内, 并且该结构光图案的颜色通道会随着投影背景画面中相应位置的像素值而自适应地改变。在投影仪前后两帧投影图像嵌入自适应结构光编码, 彩色编码图案通过对背景像素点的亮度值添加或减少一个固定编码值, 从而减少本身对背景画面的视觉干扰。

本文采用的自适应结构光编码主要由三种不

同形状的几何图案组成，分别为条形、方形和方框。三种几何图案在红、绿、蓝、黑四种颜色通道随机生成彩色结构光编码。如图3所示，图像上每个像素点的码字是以该点为中心的邻近 $3 \times 3$ 的子窗口几何图案构成的特征向量。

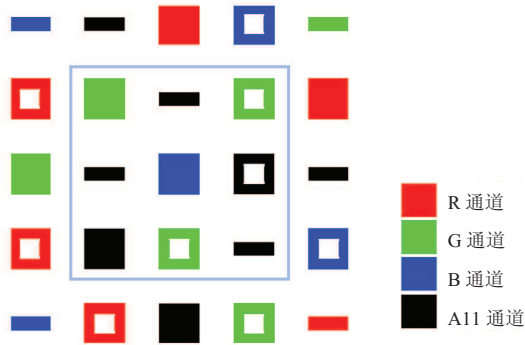


图3 自适应结构光编码图案

Fig. 3 Self-adapt encoding of structured light

三种不同的几何结构图案与四种颜色通道可以组成12个不同的特征基元。具体每个基元图案的编码如表1所示，定义图像上任意点以其为中心的 $3 \times 3$ 邻近的图案构成的子窗口作为该点的码字，不同的子窗口码字具有独特性，而且与邻域窗口的码字差异很大。图3为自适应编码的码字定义方式，每个窗口的码字编码为子窗口中从左至右，从上至下的9个基元图案组成的特征向量。一般来说，子窗口与邻域之间的码字的汉明距离差异越大，解码恢复物体三维深度信息出错概率越小，抗噪性能越强。本文提出的自适应编码任意两个子窗口之间码字的平均汉明距离达到8.2551，大于伪随机编码、M-阵列的空间编码以及几何图形编码等方案<sup>[14,15]</sup>，相比于目前空

表1 自适应编码基元码字定义

Table 1 Definition of primitive code word

几何图案	R 通道	G 通道	B 通道	3 通道
正方形	1	2	3	4
方框	5	6	7	8
条形	9	10	11	12

间结构编码的方案，不容易受到图像噪声的干扰，稳定性更高。

在编码过程，当系统检测到某一帧图像上的指尖点位置后，在以指尖点为中心附近的邻域窗口进行自适应结构光编码，采用如下的公式：

$$P_{[x,y],c} = O_{[x,y],c} + \Delta_c \quad (7)$$

其中， $O_{[x,y],c}$ 为原来投影图像中的像素值； $\Delta_c$ 为结构光编码嵌入的像素固定编码阈值。自适应编码的 $\Delta_c$ 会根据投影图像中相应点的RGB像素值而嵌入在不同的颜色通道中。假设原始像素背景的RGB值中最大的值为R通道，则该像素编码会在R通道上加上 $\Delta_c$ ，其他通道保持不变，对应的编码基元为图3中的红色图案。假设原始图像背景的RGB值均基本相等，则该像素编码将在三个通道都进行加上 $\Delta_c$ ，对应的编码基元为图3中的黑色图案。

在解码过程，系统只需要对摄像机采集的图像的前后两帧进行全局动态阈值的差分运算，并通过形态学对噪声进行处理后，便可以获得自适应编码图案的边缘轮廓。在差分的同时，我们选择图像帧相减时像素的颜色通道差最大的，作为该几何图形基元编码的通道。三种不同几何图案可以采用各自几何形状的特点进行识别。若某个区域的结构基元含有内外两层轮廓，则判断该图案为方框；如果某个区域基于水平与垂直边缘距离中心最短的距离都基本相等，可以得出结论该轮廓为正方形；否则，判定为条形。

经过解码自适应结构光后，系统可以根据空间编码结构光邻近点之间的信息关系恢复前景指尖点的深度三维信息。但在触摸互动投影系统中，我们发现检测触摸并不需要准确地获取指尖点空间中的具体三维坐标。用户在触摸投影系统时往往会更多地关注触摸的准确性与流畅性，而对于指尖点距离投影平面具体多远判定为触摸的距离精度并没有很在意。因而只需要寻找出指尖点触摸与非触摸投影屏幕之间

的阈值, 据此, 本文提出了一种新颖且简便的触摸检测方法。

假设投影平面上有一个手指正在触摸屏幕, 在摄像机捕捉的图像上检测得到的指尖点为  $I_C$ , 其对应在世界坐标上的空间点位  $I_W$ , 由于指尖点正在触摸投影平面, 因此  $I_W$  点应该位于投影屏幕所在的平面上。如图 4 所示, 由前文所述的投影仪摄像机系统的几何标定原理, 摄像机图像上的  $I_C$  点所对应的投影图像中的理论点可以由以下公式计算得到:

$$\tilde{I}_p = H_{PC} \cdot I_C \quad (8)$$

其中,  $H_{PC}$  是投影图像  $I_p$  与摄像机图像  $I_C$  之间的转换矩阵。如果指尖点正在触摸投影平面, 则理论上的点  $\tilde{I}_p$  将与实际上的点  $I_p$  非常接近, 则通过投影图像在点  $I_p$  投射出的自适应结构光编码的码字也应该相等。否则, 如果该点没有触摸到平面, 该两点的邻域窗口编码的码字也将不一致, 这是由自适应编码不同窗口之间码字的独特性决定的。因此, 我们只需要通过对理论上的结构光编码的码字与恢复解码得到的结构光码字的汉明距离进行检测, 判断是否相等, 就可以间接地判断出指尖点是否触摸投影平面。当两个邻域窗口的码字汉明距离大于一定的阈值时, 我们可以判断指尖点没有触摸到屏幕; 否则将判断为指尖点触摸屏幕。

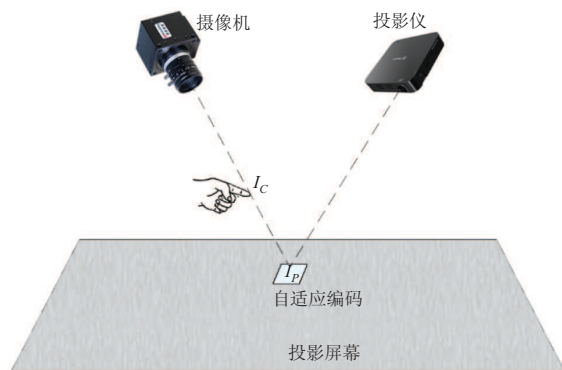


图 4 触摸检测原理

Fig. 4 Method of touch action detection

### 3 实验与结果分析

本系统将投影仪与摄像机固定在一起安装在支架上, 将投影背景画面投射在桌面或者白纸上。安装摄像机时要注意摄像机的视角需保证摄像机镜头能够完全捕捉到投影的画面。投影仪摄像机系统与桌面的投影距离约为 450 mm, 用户可以通过徒手在投影平面上进行触控交互。投影仪通过 USB 接口与计算机进行数据传输, 作为计算机的扩展屏幕将电脑桌面显示在投影屏幕上, 摄像机将采集的图像通过 IEEE-1394 接口传输给计算机进行处理。为了全面检测本系统的功能, 将分别对前景分割模块、指尖点检测模块、触摸检测模块进行实验与结果分析。

#### 3.1 前景提取实验

针对不同的光照投影背景画面的条件, 本文的前景分割算法体现了复杂多样背景下的稳定性。我们通过谷歌搜索大量背景图像, 包含人、自然风景、复杂纹理背景等各种不同复杂多样的照片, 利用投影仪投射在任意的平面上, 测试者在投影平面上摆放不同的手势, 具体算法得到的前景提取结果如图 5 所示。图中从左至右分别为投影图像、采集图像、显著性图、均值漂移结果、融合算法结果以及最终的前景分割结果。由于本文结合投影图像与摄像机图像的反射率对比的显著性检测方法可以不受投影背景的画面影响, 因而融合均值漂移的结果对复杂纹理背景的鲁棒性非常强。从图中可以看出, 本文提出的算法在不同的复杂纹理投影背景的稳定性非常好, 并且前景手臂区域分割的准确率高。

#### 3.2 指尖点定位实验

为了更加定性地验证本文的指尖定位算法的准确性, 设计了一组实验: 在自然光照下和黑暗环境下, 测试者在投影画面中不断摆出 1~5 个手指的姿势, 连续测试 300 帧图像。随后将本文算法与目前指尖点检测常用的几种不同算法进行



图5 前景提取实验结果

Fig. 5 Experimental results of foreground extraction

对比实验，其中通过记录检测到的指尖点个数与位置来计算准确率，具体结果如表2所示。

表2 指尖点定位对比实验结果

Table 2 Comparison results of localization of fingertip

方法	正确帧数(准确率)	
	自然光照(>100 lux)	较暗环境(<100 lux)
Loy <sup>[16]</sup>	265 (88.33%)	248 (82.67%)
Li <sup>[17]</sup>	271 (90.33%)	252 (84%)
Wang <sup>[18]</sup>	269 (89.67%)	257 (85.67%)
本文方法	277 (92.33%)	264 (88%)

### 3.3 触摸检测实验

为了测量本文的触摸检测方法准确度，我们采用了与文献<sup>[19]</sup>类似的实验方法。首先，通过投影仪在投影背景上投射出 $4 \times 6$ 个交叉十字图案。自适应彩色编码图案的像素大小为 $81 \times 81$ ，每个基元图案像素大小为 $9 \times 9$ 。实验测试时，测试者用指尖点尽量准确地触摸交叉十字中心位置，当程序检测到指尖点触摸交叉十字图案中心点时，该图案的边缘会变成红色，并记录当前触摸的位置点。实验采用五位不同的测试者，分别

对 $4 \times 6 = 24$ 个触摸点进行测试，每人10组，总共 $24 \times 5 \times 10 = 1200$ 个测试点，具体得出的统计结果如表3所示。

表3 触摸检测准确度结果

Table 3 Results of touch action detection accuracy

指标	准确率	
	较暗环境(< 100 lux)	正常环境(> 100 lux)
$\epsilon$ (pixels)	12.13	10.54
MDR (%)	4.76	3.84
FDR (%)	1.19	0.96

### 3.4 系统实时性效率结果

对于互动投影人机交互系统，实时性是一个很重要的用户性能指标，为了验证本文提出算法的计算时间效率与系统实时性，我们对系统运行过程中的前景区域分割、指尖点定位和触摸检测分别进行时间统计。表4为前景区域分割中显著性检测、均值漂移图像分割抽象、融合算法等步骤的统计时间结果，表5为最终系统完整流程运行时间统计的结果。从实验可以看出，总的运行时间在26 ms左右，系统可以达到实时性交互的

要求。

表 4 前景区域分割平均运行时间(ms)

显著性检测	均值漂移分割	融合算法	全过程
1.64	12.19	8.22	22.05

表 5 系统全过程平均运行时间(ms)

前景手臂区域检测	指尖点检测	触摸检测	全过程
22.05	1.07	3.11	26.23

## 4 结论与未来展望

随着人机交互技术不断地创新与发展, 由于移动设备应用最广的触摸屏技术自身存在便携性与显示屏幕尺寸难以兼容的不足, 互动投影系统在人机交互领域的研究日益备受关注。通过投影技术将任意的平面作为显示屏幕, 互动投影系统在拥有显示功能的同时利用计算机视觉来检测周围场景动态从而实现自然方便的交互方式。本文基于单目摄像机与投影仪组成的系统, 研究如何将任意的平面转变成为触摸屏的关键技术, 其主要实现可以分成前景分割、指尖点定位、触摸检测三个部分。

基于指尖触控的互动投影系统与传统的投影仪摄像机系统相比, 不需要额外的传感器设备检测, 通过普通可见光摄像头以及计算机视觉的技术让投影系统去“看”懂周围的场景动态, 从而实现人机交互。从用户体验性能看, 触控的互动投影系统拥有着很大的应用前景。该系统能够满足大型的显示屏幕需求, 同时设备体积小, 便于随身携带。从目前的技术来看, 将投影仪摄像机系统嵌入到手机大小的设备中已经可以实现。但从另一方面来看, 触控的互动投影系统基于计算机视觉的方法来检测用户指尖的空间三维位置, 比较难以实现给予用户真正的触摸屏体验。这种

交互方式将任意平面作为触摸屏, 往往缺少实体屏幕的触感, 具有一定的局限性。此外, 投影仪的功耗与使用寿命问题也将是未来触摸投影系统发展的一大挑战。

## 参 考 文 献

- [1] Raskar R, Welch G, Low KL, et al. Shader lamps: Animating real objects with image-based illumination [M] // *Rendering Techniques 2001*, Springer Vienna, 2001: 89-102.
- [2] Amano T. Projection based real-time material appearance manipulation [C] // *2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2013: 918-923.
- [3] 徐一华, 李善青, 贾云得. 一种基于视觉的手指屏幕交互方法 [J]. *电子学报*, 2007, 35(11): 2236-2240.
- [4] Shah SAH, Ahmed A, Mahmood I, et al. Hand gesture based user interface for computer using a camera and projector [C] // *2011 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications*, 2011: 168-173.
- [5] Hu W, Gong M, Hong Y, et al. High-resolution 3D reconstruction for complex color scenes with structured light [C] // *2014 IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops*, 2014: 1-6.
- [6] Harrison C, Benko H, Wilson AD. OmniTouch: wearable multitouch interaction everywhere [C] // *UIST'11 Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2011: 441-450.
- [7] Hu J, Li G, Xie X, et al. Bare-fingers touch detection by the Button's distortion in a projector-camera system [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2014, 24(4):



- 566-575.
- [8] Wilson AD. Using a depth camera as a touch sensor [C] // ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, 2010: 69-72.
- [9] Zhang Z. Computer vision technologies for remote collaboration using physical whiteboards, projectors and cameras [C] // Computer Vision for Interactive and Intelligent Environment, 2005: 109-122.
- [10] Fujii K, Grossberg MD, Nayar SK. A projector-camera system with real-time photometric adaptation for dynamic environments [C] // 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005: 814-821.
- [11] Chen XL, Yang XB, Xiao SJ, et al. Color mixing property of a projector-camera system [C] // PROCAMS'08 Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Workshop on Projector Camera Systems, 2008: 14.
- [12] Cheng Y. Mean shift, mode seeking, and clustering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(8): 790-799.
- [13] Comaniciu D, Meer P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603-619.
- [14] Albitar C, Graebler P, Doignon C. Design of a monochromatic pattern for a robust structured light coding [C] // 2007 IEEE International Conference on Image Processing, 2007: VI529-VI532.
- [15] Morana R, Ozturk C, Conn R, et al. Structured light using pseudorandom codes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(3): 322-327.
- [16] Loy G, Zelinsky A. Fast radial symmetry for detecting points of interest [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(8): 959-973.
- [17] Li Y. Hand gesture recognition using Kinect [C] // 2012 IEEE 3rd International Conference on Software Engineering and Service Science, 2012: 196-199.
- [18] Wang Q, Cheng J, Pang J, et al. Fingertip-based interactive projector-camera system [C] // 2013 IEEE International Conference on Information and Automation, 2013: 140-144.
- [19] Dai J, Chung CKR. Touchscreen everywhere: on transferring a normal planar surface to a touch-sensitive display [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2014, 44(8): 1383-1396.