

一种基于条纹和阴影识别手指触碰的算法

郑 毅, 宋 玮, 谢 翔

(清华大学, 微电子与纳电子学系, 北京 100084)

摘 要: 基于投影仪摄像头的人机交互系统关键在于如何有效实现手指的触碰操作, 针对该问题, 提出了一种基于界面条纹和手指阴影的触碰检测算法. 首先, 通过采用亚像素条纹检测算法, 得到条纹偏移量, 粗略地估计出手指是否触碰, 然后, 利用悬浮手指产生的阴影信息来进一步判定手指是否触碰. 采用单摄像头投影仪系统, 在普通室内光照环境下进行实验, 实验结果表明该算法的识别准确率为 96.82%, 运算速度达到 39.24 ms, 在保证准确性的同时又兼顾了实时性.

关键词: 单摄像头投影仪; 条纹检测; 阴影检测; 触碰识别; 识别率

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)02-0020-04

A Finger-Touching Detection Method Using Stripes and Shadow

ZHENG Yi, SONG Wei, XIE Xiang

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The challenge of touch sensitive interaction lies in detecting the touch action. In this paper, an effective method is proposed for detecting the touch operation on flat surface (e. g. tables and walls), with only one camera, by using the stripes of projection surface and the shadow of fingers. A subpixel accuracy stripes detection method is built up to calculate the stripe offset which can identify a finger touching the surface in a nearly horizon direction. To determine whether a finger suspending or touching the surface with a tilt angle, we take full use of the feature of fingertip to estimate the finger shadow area caused by hovering fingers. The experimental results are shown to illustrate the touch detection rate can reach 96.82% and the processing time is less than 39.24ms.

Key words: one camera and projector; stripe detection; shadow detection; touch judgment; touch detection rate

1 引言

近年来,随着高性能处理器以及低功耗图像传感器的发展,使得投影仪-摄像机系统在人机交互系统中有了很大的发展,但该系统进行交互时,最大的难题在于如何识别手指触碰界面,由于没有传统的LCD屏,通过压控电路等传导有效的触碰信息,系统只能利用图像处理技术,获取人手在交互界面上的位置及深度信息.

在现有的研究中,采用深度摄像机直接得到深度图像,通过对深度图像的处理分析,提取出人手的位置及深度信息,例如,Omni touch^[1]采用 Kinect,

将界面投到桌面以及墙面上.此外,Kalan^[2]等人把红外传感器安装在系统的最下方,使其在投影界面上形成一层红外薄膜,当手指触碰时,会干扰红外薄膜,通过图像传感器拍摄回的图像就可以近似获得手指的触碰信息.这些系统一般具有高精度、高鲁棒性的特点,但是价格昂贵、体积大、功耗大.对于采用普通摄像机的系统,Kane^[3]等人采用加速度计检测指尖敲击桌面时产生的加速度,从而判断触碰点击;一些研究人员提出了基于指套的触碰检测方法^[4],但对环境都有很高的要求,导致准确率不高,而且带指套也影响了用户的操作体验.

为了解决上述问题,本文提出了一种采用普通

收稿日期: 2014-03-23; 修回日期: 2014-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(61373073)

单摄像头的投影仪系统,基于界面条纹和手指阴影的触碰检测方法.该方法能够在投影距离为400 mm,普通室内灯光,桌面以及墙面上达到较高的识别率,且运算复杂度低,实时性高,设备简单,利于以后进一步小型化.

2 触碰判断的方法及原理

2.1 条纹偏移量与手指高度的关系

假设投影仪与摄像机相对于投影界面的位置是固定不变的,当手指触碰投影界面时,会使原有投影界面上的条纹产生偏移,这种偏移是由手指直接引起,如图1所示为手指触碰投影界面条纹时产生的条纹偏移.

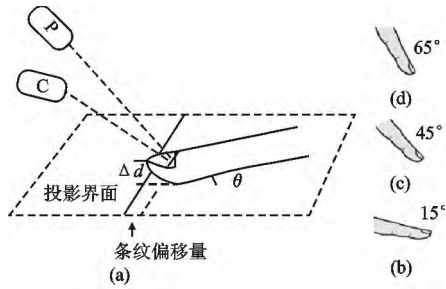


图1 手指不同角度触碰所引起的条纹偏移量

该条纹偏移量与手指高度关系^[5]可以表示为

$$\Delta m_p \approx K_p (R - \frac{tn^T}{d})^{-1} tn^T K_p^{-1} m_p \cdot \frac{\Delta d}{d} \quad (1)$$

式中, m_p 是原始条纹在投影仪像平面的位置坐标, K_p 是投影仪的内参数矩阵, Δm_p 是在投影仪像平面的条纹偏移量, Δd 是手指离投影界面的距离, 在这里称之为手指高度, R 和 t 分别是投影仪到摄像头的旋转及偏移矩阵, 表示了投影仪和摄像头的相对位置关系, n 是投影界面的单位法向量, d 是投影仪到投影界面的垂直距离.

在图1(a)所示的触碰模型中,初步建立了条纹偏移量和手指高度的线性关系,这是因为,当手指以近似水平方向触碰时,如图1(b)所示,被干扰条纹在三维空间的实际高度正好和手指高度(手指上表面到投影界面的距离)相当,通过在二维图像空间里检测条纹偏移量,就可以根据式(1)计算出实际被干扰条纹的高度,而此高度正好是手指高度,从而可以判断触碰.而在实际应用中,人们往往更习惯于以一定的角度发生触碰,如图1(b)、(c)所示,而如果继续以上述理论判断触碰的话,就会出现图2所示的误差.

图2中,悬浮的手指和以一定角度触碰的手指,

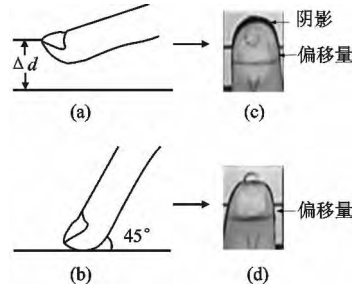


图2 悬浮手指与触碰手指的条纹偏移量

所干扰条纹在三维空间中的实际高度大体相当,导致在二维图像空间中所检测的条纹偏移量大体一致,这样就不能仅通过条纹偏移量来判断触碰.如图2(c)所示,可以利用悬浮手指所产生的阴影信息来区分这两种情况,从而进一步完成触碰的判断.

2.2 触碰判断的算法流程

触碰判断的算法流程如图3所示.

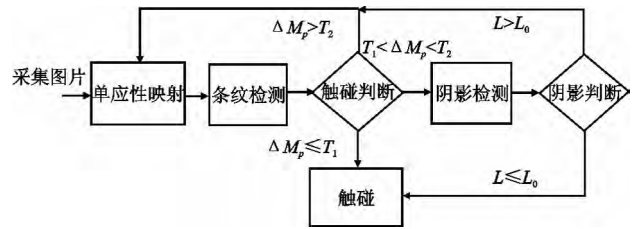


图3 触碰判断算法流程图

首先,从摄像头采集的图片经过单应性映射,映射到投影仪平面,这样输出的图像就与原图像相一致,便于后续的数据处理.

其次,输出的图像通过条纹检测模块,检测条纹位置,继而获得条纹偏移量.

然后,根据得到的条纹偏移量 ΔM_p 进行一个初步的触碰判断,具体来说,当检测的条纹偏移量小于等于 T_1 时,认为手指以接近水平方向发生触碰,当检测的条纹偏移量大于 T_2 时,认为没有触碰事件发生,对于大于 T_1 小于 T_2 的条纹偏移量,需要进入下一个模块,那阴影检测模块,来判断手指是以大的倾斜角度触碰还是悬浮的手指. T_1 的值不能太大,如果太大会导致大量悬浮的手指被误判为触碰,此外, T_1 的值也不能太小,若太小会加重阴影检测的负担,影响实时性同时可能会进一步加大阴影检测出错的概率,经过统计实验,兼顾准确率的同时考虑实时性要求,在本文虚拟键盘应用中,一般取 T_1 为12 Pixel.在图1的触碰模型中,可以看出,同一位置条纹偏移量是随着触碰角度变大而变大的,所以手指垂直触碰界面时,引起的最大条纹偏移量即

为阈值 T_2 的值, 根据具体应用, 可以通过式(1) 计算出 T_2 的值, 本文虚拟键盘应用中 T_2 为 20 Pixel.

最后, 在阴影判断过程中, 如果没有阴影存在, 则认为发生了触碰事件, 反之, 则没有发生触碰事件, 其中 L 是衡量阴影大小的一个检测参数.

3 条纹检测及阴影检测

3.1 条纹检测

本文采取了亚像素级条纹检测方法检测条纹位置, 具体如图 4 所示.

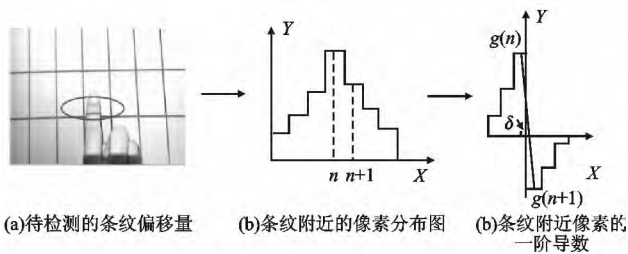


图 4 条纹检测方法流程

首先, 确定待检测的条纹区域, 如图 4(a) 所示, 再对该区域进行均值滤波, 其目的是为了消除相机或投影仪带来的高频噪声以及斑点噪声, 均值滤波器响应为

$$y(n) = \frac{f(n-1) + 2f(n) + f(n+1)}{4} \quad (2)$$

式中, $f(n)$ 是原始图像像素值.

滤波后取反的像素值分布近似为高斯分布^[6], 如图 4(b) 所示, 这样通过峰值检测, 即通过比较相邻的像素值, 获得像素值最大点的位置 n , 初步认为该位置为条纹中心位置, 为了实现亚像素级条纹检测, 需要用插值算法.

如图 4(c) 所示, 先求取滤波后取反像素值的一阶导数, 根据一阶导数的性质, 其过零点即为像素值最大点, 在其附近插值得

$$\delta = \begin{cases} \frac{g(n)}{g(n) - g(n+1)}, & f(n+1) \leq f(n-1) \\ \frac{g(n+1)}{g(n+1) - g(n)}, & f(n+1) > f(n-1) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $g(n)$ 为 $y(n)$ 的一阶导数值, 其公式为

$$g(n) = y(n) - y(n-1) \quad (4)$$

所以可得检测到的条纹位置为

$$S = n + \delta \quad (5)$$

条纹偏移量为

$$\Delta m_p = S - S_0 \quad (6)$$

式中, S_0 为原始条纹(无干扰)的位置, 其位置可以在系统校正过程中获得.

3.2 阴影检测

由于光照以及界面图像对阴影像素值的影响, 本文采取阴影的形状信息^[7]来判断阴影是否存在, 如图 5(c) 所示, 阴影轮廓与手指轮廓的形状相类似, 且两者都是边缘曲线曲率最大点, 所以可以通过计算指尖与阴影顶端的距离 L 来衡量阴影面积的大小.

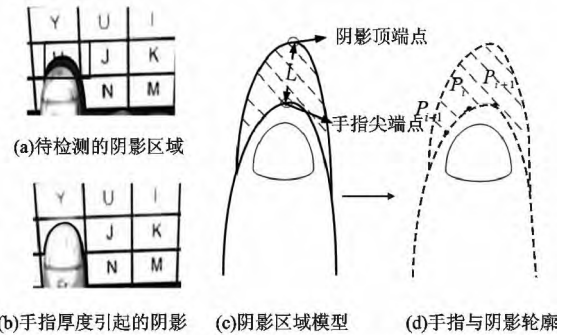


图 5 阴影检测方法流程

具体步骤如下:

(1) 对检测区域内图像, 如图 5(a) 所示, 用 Canny 算子做边缘检测, 记录图 5(d) 中虚线边缘的位置坐标;

(2) 在边缘上以间隔 K 选取三点 P_{i-1} , P_i , P_{i+1} ;

(3) 计算矢量 $\vec{p_i p_{i-1}}$ 与矢量 $\vec{p_i p_{i+1}}$ 之间的角度:

$$\theta_i = \arccos \frac{\vec{p_i p_{i-1}} \cdot \vec{p_i p_{i+1}}}{|\vec{p_i p_{i-1}}| \cdot |\vec{p_i p_{i+1}}|} \quad (7)$$

以间隔 K 遍历虚线边缘上所有的点, 重复第二步与第三步, 记录使角度达到最小时的 P_i 点, 使 θ 达到最小:

$$\theta_i = \min(\theta_1 \cdots \theta_{i-1}, \theta_i \cdots) \quad (8)$$

对手指边缘和阴影边缘分别进行上述步骤得到指尖点和阴影顶端位置, 然后计算两者的距离, 记为 L , 当 $L > L_0$ 时, 说明此时阴影存在, 手指无触碰动作发生, 如果 $L \leq L_0$, 或只检测到了一条边缘, 说明此时阴影不存在, 手指发生了触碰, L_0 是由于手指本身的厚度在手指周边形成的黑色阴影如图 5(b) 所示, L_0 在虚拟键盘应用中一般取值为 2 Pixel.

4 实验结果及分析

为验证本文算法的有效性, 建立了基于单摄像头投影仪的硬件系统, 并利用虚拟键盘来测试其结果.

4.1 单摄像头投影仪系统

该系统采用一个分辨率为 848×480 的 DLP 投影仪,和一个分辨率为 960×720 的罗技摄像头,在 400 mm 的投影距离内,投影出 14-inch 的一个投影交互界面,并实时采集交互界面图像,用以判断触碰.摄像头与投影仪的光心距离大约为 70 mm,且摄像头在投影仪的下方,这样可以充分利用阴影信息.

4.2 实验方法及结果分析

利用虚拟键盘来测试触碰算法的准确性,实验中,先产生一串随机的字母序列,系统会每隔 3 s 点亮按键一次,然后要求实验者在这 3 s 之内触碰该字母按键.

共有 5 个人被邀请参加了实验,每个人进行 4 轮实验(对系统熟悉后以不同的角度分别触碰该键盘)每轮进行 100 次触碰实验,得到 2 000 次实验数据,来测试算法的准确性.

实验结果如表 1 所示,此外,与文献[1]所提出的系统对比如表 2 所示.本文基于 OPENCV 开源库以及 C++ 代码实现该上述算法,并在 Intel Core2 Duo 3 GHz CPU 下,测试了该算法的实时性,如表 3 所示.

表 1 不同角度触碰下的 FRR 与 FAR

触碰角度	FRR/%	FAR/%	TDR/%
$0^\circ \sim 22.5^\circ$	1.65	0.55	97.80
$22.5^\circ \sim 45^\circ$	1.95	0.95	97.10
$45^\circ \sim 67.5^\circ$	2.20	1.25	96.55
$67.5^\circ \sim 90^\circ$	2.30	1.85	95.85
平均	2.03	1.15	96.82

表 2 相关系统的 TDR

相关系统	TDR/%	系统构成
Omni touch	96.5	投影仪, Kinect
proposed	96.82	投影仪, 普通摄像头

表 3 系统实时性测试结果

程序模块	单应性映射	条纹检测	阴影检测	总计
所用时间/ms	20.34	7.94	10.96	39.24

由表 1~3 得出,本文算法的准确性与已有文献中的准确性相当,但在系统实现上,文献[1]中用的是微软的 Kinect 深度摄像机,而本文只利用了单摄像头和投影仪系统,系统实现简单,功耗低,为将来小型化奠定了基础,且在实时性上也基本满足人们的需求,此外,相对于 IPS^[5],本文的算法可以检测

手指以一定角度的触碰动作,这更符合人们的实际操作习惯.

5 结束语

本文利用了界面条纹的偏移量初步判断了手指以近似水平方向的触碰,再利用悬浮手指所产生的阴影信息,来消除悬浮手指的误判,进而判断手指是以一定角度发生的触碰.本文还介绍了用于计算条纹偏移量的亚像素条纹检测方法,以及利用曲率根据手指和阴影轮廓计算阴影大小的方法.从实验可以看出,在普通室内灯光的环境下,该算法简单有效,判断触碰的误差率小于 3.5%,处理速度也小于 40ms.在将来的研究中,我们会在不同的环境,不同光照条件下,改善本文的算法,并建立模型,研究界面其他特征是否也能被利用来判断触碰.

参考文献:

- [1] Harrison C, Benko H, Wilson A D. Omni Touch: wearable multitouch interaction everywhere [C] // Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology. USA: Santa Barbara, 2011:441-450.
- [2] Do-Lenh S, Kaplan F, Sharma A, et al. Multi-finger interactions with papers on augmented tabletops [C] // Proceedings of the 3rd international Conference on Tangible and Embedded interaction. China: Chengdu, 2009:267-274.
- [3] Kane S K, Avrahami A, Wobbrock J O, et al. Bonfire: a nomadic system for hybrid laptop-tabletop interaction [C] // Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology. Canada: Victoria, 2009:129-138.
- [4] Mistry P, Maes P, Chang L. WUW-wear Ur world: a wearable gestural interface [C] // CHI'09 extended abstracts on Human factors in computing systems. USA: Boston, 2009:4111-4116.
- [5] Hu J, Li G, Xie X, et al. Bare-fingers touch detection by the button's distortion in projector-camera System [C] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. China: Nanjing, 2013.
- [6] Forest J, Salvi J, Cabruja E, et al. Laser stripe peak detector for 3D scanners. A FIR filter approach [C] // Pattern Recognition, ICPR 2004, Proceedings of the 17th International Conference on. UK: Cambridge, 2004(3):646-649.

(下转第 27 页)

5 实验结果

根据以上分析,在 Vertex-II FPGA 上实现了 SM4 算法并对其进行实测数据下的 DPA 攻击.图 2 为采用选择明文 DPA 攻击时,256 个猜测密钥产生均值差随样本量的演变图,从图中可以看出,正确密钥的均值差是均值差集合中最大的,选择明文 DPA 成功.图 3 为利用普通 DPA 对 SM4 算法进行攻击时(S 盒输出为选择函数),256 个猜测密钥产生的均值差随样本量的演变图.从图 3 中可以看出直接针对 SM4 的 FPGA 进行普通 DPA 无法得到任何密钥信息,从而破解失败.

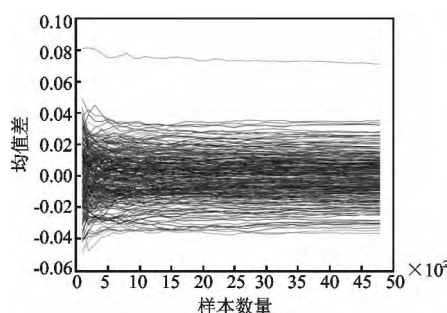


图 2 选择明文 DPA 的均值差演化图

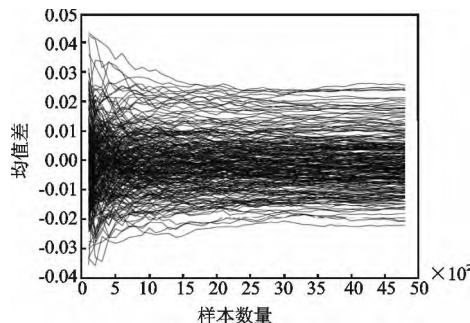


图 3 普通 DPA 的均值差演化图

6 结束语

在合理硬件假设的基础上分析 SM4 算法的 DPA 特性,发现其由于具有线性结构 L 从而具备抗 DPA 特性.归纳了“混合结构”的混合特性与抗 DPA 特性的数学关系,从而得到一套算法层次的 DPA 防护方案.以上研究不仅得到了 SM4 算法的抗 DPA 特性,也为新算法的抗 DPA 设计提供了参考.

(上接第 23 页)

[7] 赵永锋,王毅刚.采用手指的三维人机交互方法[J].微电子学与计算机,2009,26(6): 21-24.

作者简介:

郑毅 男,(1988-),硕士研究生.研究方向为 3D 测量、图

参考文献:

- [1] Kocher P, Jaffe J, Jun B. Differential power analysis [C]//Advances in Cryptology—CRYPTO'99. Berlin, Heidelberg; Springer, 1999: 388-397.
- [2] 李浪,焦铭,李仁发,等.一种 ECC 加密芯片抗功耗攻击研究[J].微电子学与计算机,2011,28(1): 2-6.
- [3] Tiri K, Verbauwhede I. A VLSI design flow for secure side-channel attack resistant ICs[C]//Proceedings of the conference on Design, Automation and Test in Europe—Volume 3. Germany: Munich, IEEE Computer Society, 2005: 58-63.
- [4] Clavier C, Coron J S, Dabbous N. Differential power analysis in the presence of hardware countermeasures [C]//Cryptographic Hardware and Embedded Systems—CHES 2000. Berlin, Heidelberg; Springer, 2000: 252-263.
- [5] Chari S, Jutla C S, Rao J R, et al. Towards sound approaches to counteract power-analysis attacks [C]//Advances in Cryptology—CRYPTO'99. Berlin, Heidelberg; Springer, 1999: 398-412.
- [6] Brier E, Clavier C, Olivier F. Correlation power analysis with a leakage model [C]//Cryptographic Hardware and Embedded Systems—CHES 2004. Berlin, Heidelberg; Springer, 2004: 16-29.
- [7] Bai X, Guo L, Li T. Differential power analysis attack on SMS4 block cipher [C]//Circuits and Systems for Communications, ICCSC 2008, 4th IEEE International Conference on. China; Shanghai, IEEE, 2008: 613-617.
- [8] Messergers T S, Dabbish E A, Sloan R H. Examining smart-card security under the threat of power analysis attacks[J]. Computers, IEEE Transactions on, 2002, 51(5): 541-552.

作者简介:

邱爽 女,(1990-),硕士.研究方向为侧信道攻击.

白国强 男,(1963-),博士,副教授,博士生导师.研究方向为信息安全芯片.

陈弘毅 男,(1942-),硕士,教授.研究方向为集成电路(IC)设计.

像处理和人机交互方式. E-mail: zhengy4446@163.com.

宋玮 男,(1988-),硕士研究生.研究方向为 3D 测量、图像处理和人机交互.

谢翔 男,(1971-),副研究员.研究方向为集成电路系统设计、图像处理、无线通信、生物医学电子学等.