

# 基于多目视觉技术的多点触摸屏系统的实现方法

陈俊彦, 张红梅, 李鹏飞, 何燕

(桂林电子科技大学, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 设计了一种基于多目视觉技术的多点触摸屏系统; 系统使用 3 个摄像机分别置于显示屏的左右两端和前方, 利用计算机图像处理技术使普通显示屏具备触摸功能; 为了有效减少图像处理时间, 提高指尖坐标精度, 提出了基于卡尔曼滤波器的指尖跟踪算法, 通过卡尔曼滤波器预测指尖位置并以预测指尖点为中心划出矩形感兴趣区域进行指尖检测算法处理; 实验证明, 该系统能实时运行在嵌入式平台, 并可实现较高的点击成功率, 对于实现基于计算机视觉的触摸屏技术有着重要的研究意义。

**关键词:** 多目视觉; 多点触摸屏; 卡尔曼滤波器; ROI

## Implementation Method of Multi-Touch Screen System Based on Multi-vision Technology

Chen Junyan, Zhang Hongmei, Li Pengfei, He Yan

(Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** This paper designed a multi-touch screen system based on multi-purpose vision technology. The system placed three cameras in front of the display and the left and right ends, and enabled ordinary display with touch functionality using computer image processing technology. In order to effectively reduce the image processing time and improve the accuracy of the coordinates of the fingertip, fingertip tracking algorithm was proposed based on the Kalman filter. The fingertip as the center point of ROI (Region of Interest) was predicted by Kalman filter. Experimental results show that the system can effectively run in the real-time embedded platform and achieve the instant detection of finger clicking actions, and it has important significance for the computer vision-based touch-screen technology.

**Keywords:** multi-vision technology; multi-touch screen; kalman filter; ROI

## 0 引言

触摸屏技术作为嵌入式便携设备人机交互的主要方式, 以其优越的便携性和简易性, 在人机交互领域中扮演着重要角色。但是电容式和电阻式等传统的触摸屏技术<sup>[1-3]</sup>却存在着分辨率低、成本高、校准难、触摸动作响应不灵活等缺陷, 严重制约人机交互的发展。随着数字图像分析理论与计算机硬件计算速度的迅速发展, 基于视觉技术的光学触摸屏成为当前人机交互领域研究的热点。

现有的基于视觉技术的光学触摸屏主要利用单个摄像机采集图像, 根据手指指尖的触点面积、轮廓及运动方向等信息进行建模, 从而估算指尖点的坐标值<sup>[4-6]</sup>。该类方法对硬件要求不高, 实现简单, 但无法获取指尖触摸深度, 难以实现较为复杂的触摸功能。另有研究人员提出基于双目视觉的触摸屏系统<sup>[7-9]</sup>, 在实现触摸深度判断的同时也提高了获取指尖坐标值的精度, 但该类方法需在同一时刻处理两帧图像, 增加了系统的复杂度, 难以保证系统的实时性。

本文提出了基于多目视觉技术的光学触摸屏系统, 可同时

收稿日期: 2014-05-20; 修回日期: 2014-07-02。

**基金项目:** 国家科技支撑计划(2012BAH18F00); 桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目(GDYCSZ201413)。

**作者简介:** 陈俊彦(1985-), 男, 硕士, 助教, 主要从事图像处理、嵌入式系统方向的研究。

张红梅(1970-), 女, 博士, 教授, 主要从事无线入侵检测、嵌入式系统方向的研究。

获取指尖点的坐标和指尖触摸深度。考虑到系统的实时性, 提出一种基于卡尔曼滤波器的指尖跟踪算法, 通过卡尔曼滤波器预测指尖位置并以预测指尖点为中心划出矩形 ROI (region of interest, 感兴趣区域) 进行指尖检测算法处理, 减少图像处理时间, 有效提高指尖坐标精度。

## 1 系统硬件架构设计

本文设计的基于多目视觉技术的多点触摸屏系统, 主要由显示屏、2 个水平摄像机、1 个垂直摄像机和图像处理装置组成。其中 2 个水平摄像机分别放置在显示屏的左右两端, 并同时指向显示屏边框; 垂直摄像机放置在显示屏的前方, 指向显示屏且整个显示屏处于垂直摄像机的取景范围内; 2 个水平摄像机和 1 个垂直摄像机的输出端均与图像处理装置的输入端相连。系统硬件架构如图 1 所示。

在图 1 中, 水平摄像机采集的图像主要用于获取指尖触摸的深度, 当手指进入水平摄像机取景范围后, 可根据手指指尖点与显示屏边框的距离判断是否产生触摸, 如图 2 所示。若指尖点远离显示屏边框, 则认为未发生触摸; 若指尖点与显示屏边框的距离等于或小于设定的距离值时, 则认为产生了触摸动作。水平摄像机需在显示屏左右两端各放置一个, 这样可防止屏幕出现左端或右端摄像机取景范围覆盖不到的死角。垂直摄像机采集的图像主要用于跟踪和获取控制指尖点并转换为显示屏的坐标值, 放置在显示屏前方且取景范围必须包含整个显示屏。图像处理装置可以是 PC 机或支持操作系统的高端嵌入式设备。

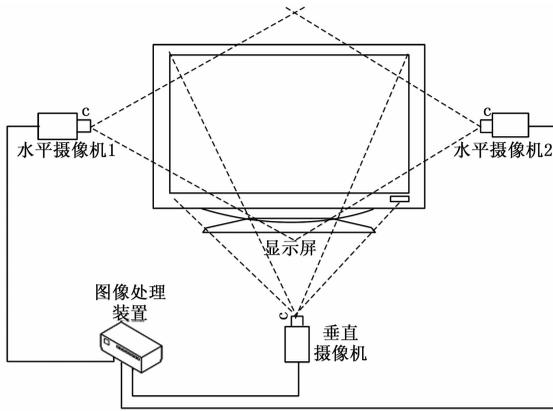


图 1 系统硬件架构图

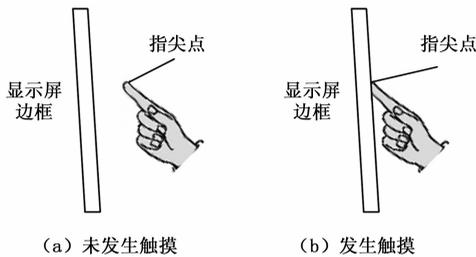


图 2 手指触摸屏幕示意图

## 2 系统模块设计

基于多目视觉技术的多点触摸屏系统实现流程共包括 6 个模块: 触摸判断模块、触摸控制点提取模块、系统标定模块、坐标转换模块、点击检测模块和指尖跟踪模块, 如图 3 所示。

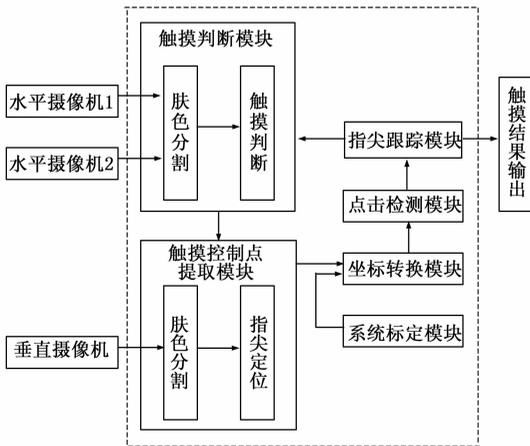


图 3 系统结构框图

根据图 3 的系统结构框图, 基于多目视觉技术的多点触摸屏系统的实现共包括如下 5 个步骤:

1) 图像处理装置预先对置于显示屏前方的垂直摄像机进行系统标定<sup>[10]</sup>, 获取垂直摄像机的内参数, 和以显示屏左上角为现实坐标系原点、以显示屏平面为  $Z=0$  平面的外参数, 从而得到垂直摄像机的成像平面坐标与显示屏平面坐标的转换关系;

2) 图像处理装置启动 2 个水平摄像机, 在系统初始化时

显示屏左右两端的水平摄像机记录显示屏边框在图像中的位置; 当手指进入水平摄像机取景范围后, 采用融合 GVF Snake 与肤色模型的肤色分割算法<sup>[11]</sup>提取出手指的轮廓, 在轮廓上根据曲率的变化检测手指的指尖点<sup>[12]</sup>, 并根据手指指尖点与显示屏边框的距离判断是否产生触摸;

3) 当产生触摸时, 图像处理装置启动垂直摄像机, 同样采用融合 GVF Snake 与肤色模型的肤色分割算法和基于曲率的指尖检测算法获取指尖的像素点坐标值;

4) 图像处理装置根据成像平面坐标与显示屏平面坐标的映射关系, 将指尖的像素点坐标值转换为显示屏对应的坐标;

5) 图像处理装置根据系统操作的手势动作定义进行点击检测, 若符合点击条件, 则转换为相应的指令完成触摸操作, 输出触摸结果; 若不符合, 则触摸操作未完成, 采用指尖跟踪算法对指尖点进行跟踪, 预测下一帧图像指尖点位置, 并重新执行步骤 2), 不断循环直至触摸操作结束。在随后的图像处理中, 均以预测的指尖点为中心点划出 ROI 区域作为图像处理的区域, 减少图像处理时间, 有效提高指尖坐标精度。

当图像处理装置完成了触摸操作检测后, 将会产生触摸的结果信息, 包括控制点坐标及动作信息(如单击、双击等)。随后装置将触摸结果信息发送至 GUI 界面的控制处理装置, 完成触摸功能。

## 3 基于卡尔曼滤波器的指尖跟踪算法

当手指在屏幕上滑动时, 指尖在连续多帧图像中的位置构成了一条直线或曲线的运动轨迹。通过指尖跟踪算法可实现对指尖位置的连续捕获及预测, 是基于计算机视觉的触摸屏技术的关键步骤, 指尖跟踪算法的准确性是评价光学触摸屏好坏的主要标准之一。

当前, 对物体运动轨迹估计算法大致可分为两类: 一类是基于模板匹配的估计算法<sup>[13-14]</sup>, 如直方图匹配、Camshift 跟踪算法等, 该类算法是基于颜色特征的跟踪算法, 需要在指尖上贴上特殊颜色的标签才能准确跟踪指尖, 限制了用户的操作, 使人机交互变得不自然; 另一类是根据运动学模型的轨迹估计算法<sup>[7, 15-16]</sup>, 如粒子滤波算法和卡尔曼滤波算法。该类算法采用滤波器对指尖或肤色进行采样跟踪, 能在保证系统实时性的基础上提供准确的指尖跟踪效果。

本文选择卡尔曼滤波器算法作为指尖跟踪算法。该算法采用递归滤波的方法进行计算, 具有计算量小、跟踪效果好等特点。

卡尔曼滤波算法包含信号模型和观测模型, 式 (1) 为信号模型, 式 (2) 为观测模型。

$$\hat{X}_k = \mathbf{A}X_{k-1} + \mathbf{B}U_k + \mathbf{W}_k \quad (1)$$

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}X_k + \mathbf{V}_k \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{A}$  为状态转移矩阵,  $\mathbf{B}$  为控制矩阵,  $\mathbf{H}$  为观测矩阵,  $U_k$  为控制向量,  $\mathbf{W}_k$  和  $\mathbf{V}_k$  分别为正态分布的运动和测量噪声向量, 且互不相关。 $\hat{X}_k$  为时刻  $k$  的预测状态向量和,  $X_{k-1}$  为时刻  $k-1$  的系统状态向量。状态向量可表示为  $[x_k, v_{xk}, y_k, v_{yk}]^T$ , 其中  $x_k$  和  $y_k$  分别是手指指尖像素点在图像  $x$  轴和  $y$  轴上的坐标分量,  $v_{xk}$  和  $v_{yk}$  分别是手指指尖像素点在图像  $x$  轴和  $y$  轴上的速度。 $\mathbf{Z}_k$  为时刻  $k$  的系统测量向量, 表示为  $[x_k, y_k]^T$ 。

卡尔曼滤波器跟踪过程分为预测和校正两个阶段。在预测阶段, 滤波器根据信号模型和上一时刻状态, 采用最小二乘估

计法估计当前的随机模型状态，并根据式 (3) 求出先验误差相关矩阵  $\hat{P}_k$ 。由于在跟踪过程中相邻两帧图像的时间间隔较小，因此指尖坐标在  $x$  轴和  $y$  轴上的变化可近似认为一个被随机加速扰动的直线运动，控制向量  $U_k$  即为加速度  $a_k$ ，且服从正态分布的随机量  $a(t) \sim N(0, \sigma_w^2)$ 。

$$\hat{P}_k = AP_{k-1}A^T + Q \quad (3)$$

式中， $P_{k-1}$  为前一时刻的后验误差相关矩阵， $Q$  为运动噪声的协方差矩阵。

在校正阶段，滤波器在给定模型状态的测量参数和观测模型基础上，调节随机模型状态，如式 3~式 6 所示。

$$K_k = \hat{P}_k \cdot H^T \cdot (H\hat{P}_kH^T + R)^{-1} \quad (4)$$

$$X_k = \hat{X}_k + K_k \cdot (Z_k - H\hat{X}_k) \quad (5)$$

$$\hat{P}_k = (I - K_kH) \cdot \hat{P}_k \quad (6)$$

式中， $K_k$  为卡尔曼增益矩阵， $R$  是测量噪声的协方差矩阵  $P_k$  当前时刻的后验误差相关矩阵。

在手指指尖跟踪过程中，系统根据获取的第一个指尖点初始化卡尔曼滤波器，然后采用式 (1) 进行下一帧图像指尖位置的预测。在随后的图像处理中，以预测的指尖点为中心点划出 ROI 区域作为图像处理的区域进行肤色分割和指尖定位。在获取准确的手指指尖坐标值后，将其作为系统状态向量  $Z_k$ ，代入式 (5) 进行滤波器校正，并根据式 (4)~式 (6) 更新测量参数。校正后再进行指尖位置的预测，不断循环直至触摸操作结束，如图 4 所示。上述 ROI 区域是以卡尔曼滤波器预测的指尖点为中心、边长固定的矩形区域，在随后的图像算法中只需对这帧图像 ROI 区域内的数据进行处理，可减少图像处理时间，提高指尖坐标精度，有效增强系统的实时性和鲁棒性。

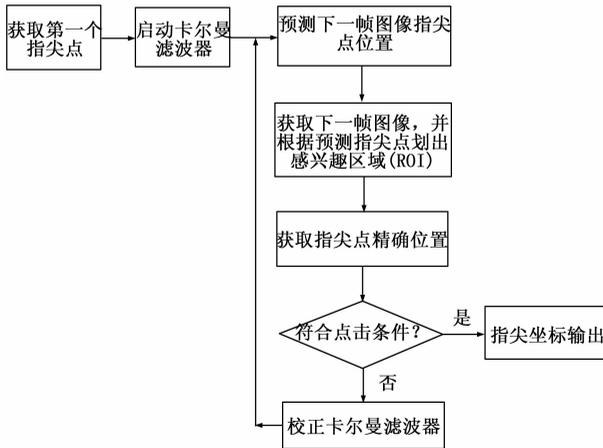


图 4 卡尔曼滤波器指尖跟踪流程图

当有多个手指进行触摸时，可根据指尖数量开启多个卡尔曼滤波器分别跟踪各个指尖，并根据指尖间的距离划出多个 ROI 区域进行肤色分割和指尖定位。当 ROI 区域之间产生重合，在 ROI 区域可能会出现多个肤色轮廓，则以距离预测指尖点直线最近的轮廓拐点作为触摸的指尖点。

#### 4 系统测试与分析

本文选择在桂林电子科技大学云计算与复杂系统重点实验室研制的 GUET-GW 嵌入式平台进行测试。该平台采用龙芯 2 H 处理器，主频 1 GHz，配置 2GB DDR3 内存和 32 G 固态硬

盘。显示屏为三星 19 寸液晶显示器，分辨率设置为  $1\ 366 \times 768$ 。软件环境为 Visual Studio 2008 编译环境和 OpenCV 计算机视觉处理库函数。由于水平摄像机用于判断触摸是否发生，对指尖精度要求不高，为了保证系统的实时性，水平摄像机采用图像分辨率为  $320 \times 240$  pix 的中星微 ZC301B 摄像头。垂直摄像机则采用图像分辨率为  $640 \times 480$  pix 的天敏“新晶锋”摄像头。3 个摄像头的采集帧率均为 25 帧/s。在指尖跟踪过程中设定矩形 ROI 区域边长为  $128 \times 96$  pix。

本文设计了一个用于测试点击的测试界面，在界面的中心和四角各设置一个测试按钮，用于测试界面各个位置的触摸坐标定位准确率。当手指成功单击其中某个测试按钮，按钮对应计数器数值加 1；若未成功，则计数器数值不变。

首先测试系统的单点击效果，使用食指分别对测试按钮 1 到测试按钮 5 进行点击，如图 5 (a) 所示。测试结果如表 1 所示。

表 1 单点击测试结果

点击测试按钮	测试次数	点击成功次数	成功率/(%)
测试按钮 1	100	89	89
测试按钮 2	100	80	80
测试按钮 3	100	81	81
测试按钮 4	100	85	85
测试按钮 5	100	92	92

由表 1 可知，测试按钮 1 和按钮 5 有较高的点击成功率，这是由于在屏幕左上角和屏幕中央可获取比较完整的人手区域，从而能够准确地获取指尖坐标。而在屏幕的左下角和右下角获取的人手区域面积较少，因此测试按钮 2 和按钮 3 的点击准确率相对较低，但点击成功率也能在 80% 以上。

随后测试系统的多点击效果。使用大拇指和食指同时点击测试按钮 1、5 和测试按钮 2、5，实现第四章定义的鼠标左键双击功能，如图 5 (b) 所示。操作成功则相应计数器数值加 1，否则计数器数值不变。测试结果如表 2 所示。

表 2 多点击测试结果

点击测试按钮	测试次数	点击成功次数	成功率/(%)
测试按钮 1、5	100	86	86
测试按钮 2、5	100	85	85

由表 2 可知，系统同样能准确实现双指的点击，点击测试按钮 1、5 和点击测试按钮 2、5 成功率基本相等，能达到 85% 以上。



图 5 指尖点击测试

最后对系统中 3 个摄像机的图像处理算法进行耗时测试，  
(下转第 182 页)

