

文章编号 1004-924X(2011)08-1911-10

## 实时手指交互系统的嵌入式实现

向守兵<sup>1,2\*</sup>, 苏光大<sup>2</sup>, 任小龙<sup>2</sup>, 吉倩倩<sup>2</sup>, 方 飞<sup>2</sup>

(1. 四川工程职业技术学院 电气信息工程系, 四川 德阳 618000; 2. 清华大学 电子工程系, 北京 100084)

**摘要:** 为满足便携式设备中人机交互的需要, 设计了嵌入式手指交互系统。研究了系统所采用的肤色分割、凸包计算、指尖检测等算法, 并完成了硬件设计。首先, 根据肤色的聚类特征, 在对比分析常用彩色空间特性的基础上建立肤色模型, 对手进行分割; 提出射线扫描法对经典 Graham 扫描算法进行改进, 快速计算人手凸点。然后, 分析了利用手指轮廓弯曲特征检测指尖的算法。最后, 介绍了以 DSP 和 FPGA 为微处理器构成的硬件系统。实验结果表明, 设计的系统对自然伸展的单个手指正确检测率为 95.2%, 对弯曲手指的正确检测率为 92.6%, 对在非目标手指干扰下的正确检测率为 90.1%; 而对指尖的定位最大偏移量为 2.12 mm; 指尖定位总耗时约为 23 ms。所设计的嵌入式手指交互系统稳定可靠、满足实时要求。

**关键词:** 机器视觉; 手指交互; 嵌入式系统; 人手分割; Graham 扫描

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111908.1911

## Embedded implementation of real-time finger interaction system

XIANG Shou-bing<sup>1,2\*</sup>, SU Guang-da<sup>2</sup>, REN Xiao-long<sup>2</sup>, JI Qian-qian<sup>2</sup>, FANG Fei<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical Engineering and Information,  
Sichuan Engineering Technical College, Deyang 618000, China;

2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

\* Corresponding author, E-mail: 8255@secetc.net

**Abstract:** To meet the need of human-machine interaction of the portable equipment, an embedded finger-interaction system was designed, and the algorithms applied to the system, such as skin color segmentation, convex hull computation, and fingertip detection, were investigated and the hardware was also implemented. Firstly, according to the clustering characters of skin color, a human hand was segmented via building the skin color model by analyzing the characters of common color spaces. Then, the classic Graham-scan method was improved based on the radial-scan method, and the convex hull of the human hand was computed quickly. Furthermore, the algorithm of fingertip detection which uses the curve of human finger was discussed. Finally, the hardware structure based on the Digital Signal Processing(DSP) and Field Programming Gate Array(FPGA) was introduced. Experimental results indicate that the detecting precision is 95.2% for a natural stretched finger, 92.6% for the bended finger and 90.1% for other fingers under the disturbance, respectively. Moreover, the maximum offset of fingertip location is 2.12 mm and the location time is 23 ms. The system is natural and

收稿日期: 2011-03-17; 修订日期: 2011-04-15.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2007CB310600)

friendly, and has strong stabilization and real-time characteristics.

**Key words:** machine vision; finger interaction; embedded system; hand segmentation; Graham scan

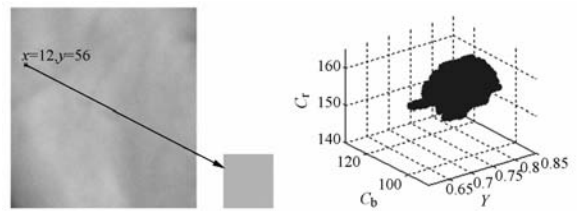
## 1 引言

手指行为是人们利用手指运动信息和手指形态与外界进行有效、直观、方便、习惯的交流方式之一。基于视觉的手指交互在新一代智能、高效的人机交互系统中处于非常重要的地位<sup>[1]</sup>。手指交互技术的应用主要有 4 类:(1)手语识别<sup>[2-3]</sup>。利用机器视觉和模式识别实现手语与语音、文字之间的相互转换,辅助特殊人群学习与交流。(2)手势识别<sup>[4-5]</sup>。利用静态或动态手势进行人机交互,在身份识别、机器人控制和家用电器控制等方面具有广阔的应用前景。(3)手指书写<sup>[6]</sup>。将手指的运动轨迹检测与文字识别技术结合取代传统键盘进行文字输入,也可用于手指绘画。(d)虚拟触控<sup>[7-9]</sup>。采用非接触式虚拟屏幕技术,可用于 3D 互动游戏、设备虚拟维修和模拟手术等领域。由于人手形变的高维度以及视觉本身的不适定性,基于视觉的手指交互是一项极富挑战性的研究课题。其中,人手分割和指尖检测与定位是手指交互过程中的一项关键技术,直接影响手指特征提取和交互指令理解的结果<sup>[10]</sup>。目前人们所研究的人手分割和指尖检测与定位算法复杂度较高,对设备的依赖性比较强,主要以计算机为平台实现,不适于便携式移动设备的人机交互操作。

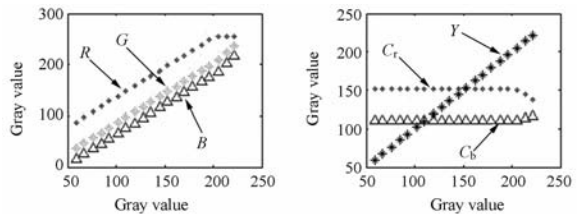
针对上述问题,本文以 DSP 和 FPGA 处理器为核心,采用领域帧存和并行处理的结构与思想设计了嵌入式手指交互硬件平台。为满足实时性的要求,首先采用  $YC_bC_r$  彩色模型和形态学计算进行人手分割,然后结合凸包信息和指尖的曲率特征进行指尖检测。为解决人手凸包计算量大的问题,提出一种改进的快速凸包计算方法,减少了 70% 左右的计算量。实验证明,系统不对外界环境做特殊限制,能对裸手进行鲁棒的分割,并实现实时准确的指尖定位。系统能脱离计算机独立运行,可用于便携式移动设备中的手指交互操作。

并且肤色的不同主要由颜色的亮度不同引起,色度相对比较稳定,因此利用肤色信息可以比较理想地将人手肤色区域从背景中分割出来。常用的彩色空间有 RGB、HSV、YIQ 和  $YC_bC_r$  等,肤色在各个彩色空间中的分布特征区别较大<sup>[11]</sup>,合理地选取彩色空间是人手肤色分割的关键。

为考查肤色在不同彩色空间中受光照影响的程度,设计了如下实验。首先在如图 1(a)人手肤色图像中随机截取一个像素的图像,如坐标为 (12, 56) 的单像素图像;然后用 Matlab 在 [50, 220] 内对所截取的单像素图像进行亮度调整,并分别测量该图像在 RGB 和  $YC_bC_r$  两种彩色空间中各分量的值;最后绘制各分量值随亮度变化的趋势图,如图 1(c)和图 1(d)所示。



(a) 人手肤色图像 (b)  $YC_bC_r$  空间肤色聚类图  
(a) Image of hand skin (b) Clustering chart of skin color in  $YC_bC_r$  space



(c) RGB 空间各分量随亮度变化趋势图 (d)  $YC_bC_r$  空间各分量随亮度变化趋势图  
(c) Tendency chart of each component with brightness variations in RGB space (d) Tendency chart of each component with brightness variations in  $YC_bC_r$  space

图 1 肤色特征实验

Fig. 1 Experiments of skin color characteristics

## 2 人手分割算法

人的肤色分布在彩色空间中很小的范围内,

对比分析图 1(c)和图 1(d)可知,RGB 彩色空间中的  $R, G, B$  3 个分量受亮度影响较大;而在  $YC_bC_r$  彩色空间中  $C_b$  和  $C_r$  分量值在亮度  $Y \in$

[50, 200]内基本保持恒定,受光照影响较小,这是由亮度信号与色度信号分离所致;而且人手肤色在  $YC_bC_r$  彩色空间具有良好的聚类特征,如图 1 (b)所示。综合这两方面考虑,系统采用  $YC_bC_r$  彩色空间进行人手肤色分割。

为提高肤色分割速度,选取飞利浦 SAA7113 解码器进行硬件 A/D 转换,直接输出经过伽玛校正的符合 ITU-656 标准的  $YC_bC_r4:2:2$  格式数字图像<sup>[12]</sup>,在后续算法中不需要增加 RGB 空间到  $YC_bC_r$  空间转换的额外开销。该 8 位数字图像紧接着送到采用 DaVinci 技术的高速 DSP 处理器 TMS320DM648 中进行处理,并建立如下  $YC_bC_r$  彩色空间的肤色检测模型:

$$\text{Result} = \begin{cases} 1 & \tan \theta \in [\text{Tan\_Min}, \text{Tan\_Max}] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\theta$  为相位角,表示色调,  $\tan \theta = \left| \frac{C_r}{C_b} \right|$ ; Result 为肤色检测结果,为 1 表示肤色区域,为 0 表示非肤色区域。

通过对近 3 000 张人手肤色图像进行实验测试,取  $\text{Tan\_Min}=1.2, \text{Tan\_Max}=1.6$  时分割准确率较高。对肤色分割后的人手图像再经过开运算消除背景粘连<sup>[13]</sup>,最后分割结果如图 2 所示。

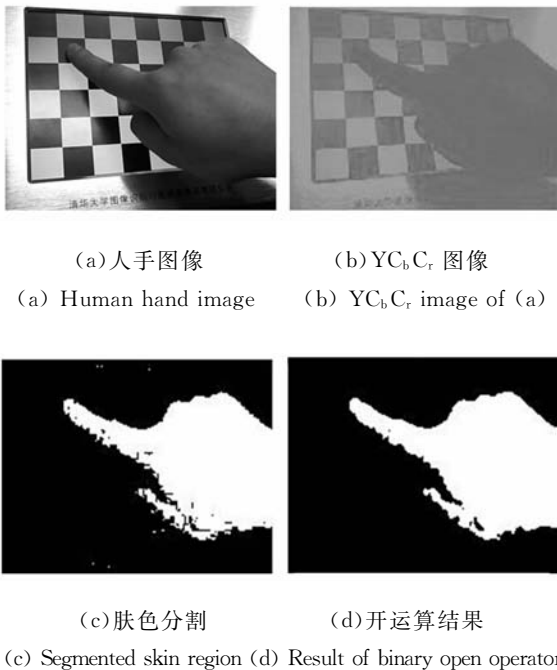


图 2 人手分割

Fig. 2 Hand segmentation

### 3 指尖检测关键算法

#### 3.1 改进的 Graham 扫描算法

凸包是包围一个平面点集所有点的最小凸多边形,对于平面中  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_N$   $N$  个点的凸包  $C$  可表示为<sup>[14]</sup>:

$$C = \left\{ \sum_{j=1}^N \lambda_j p_j \mid \lambda_j \geq 0, \sum_{j=1}^N \lambda_j = 1 \right\}, \quad (2)$$

式中: $C$  为凸包; $p_j$  为凸包内第  $j$  个点; $N$  为凸包内点的数量; $\lambda_j$  为  $p_j$  的权值。

如图 3 所示,由  $p_0, p_1, p_2, p_5, p_8, p_9$  所围成的多边形即为  $p_0 \sim p_9$  10 个点的凸包, $p_0, p_1, p_2, p_5, p_8, p_9$  共 6 个点即为凸点。

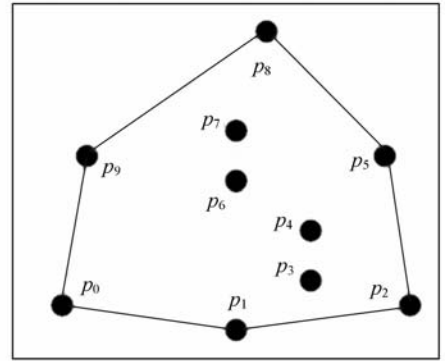


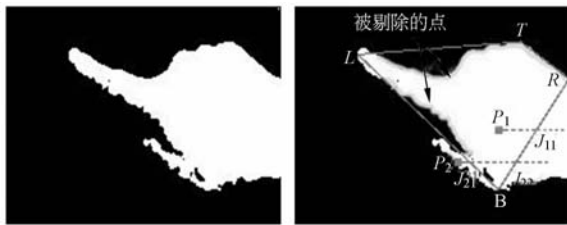
图 3 凸包示意图

Fig. 3 Convex hull image

较为经典的凸包计算方法主要有 Graham 扫描法、增量法、卷包裹法和分治法等。由于 Graham 扫描算法比较简单,因此适于在 DSP 里实现。但经典 Graham 扫描算法的时间复杂度为  $O(N \log N)$ ,其中  $N$  为参加构建凸包离散点的个数,计算量较大<sup>[15]</sup>,必须对它进行改进,才能适应嵌入式系统实时性的要求。分析图 3 可知,凸包内部点集显然不可能成为最后的凸包顶点,并且由于人手轮廓的特殊性,这部分点集往往数目巨大,剔除内部点集可以大大减少后续计算量。本文提出一种射线扫描方法对经典的 Graham 扫描算法进行改进,改进后的算法具有经典 Graham 扫描算法实现简单的优点,同时又大大减少了扫描凸点的数量,降低了 DSP 运算复杂度和运算量,提高了手指检测的实时性。

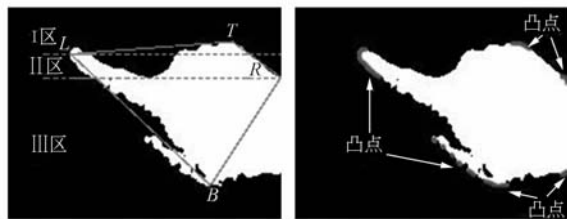
算法的基本思路是:在分割出的二值人手图像上分别找出最左端顶点  $L$ 、最右端顶点  $R$ 、最上

端顶点  $T$  和最下端顶点  $B$ , 在搜寻最左、最右顶点时, 如果横轴坐标值一样, 则纵轴坐标值最小的为顶点; 在搜寻最上、最下顶点时, 如果纵轴坐标一样, 则横轴坐标值最小的为顶点。然后由 4 个顶点构成一个四边形, 如图 4(b) 所示的  $LTRB$  四边形, 不难证明位于此四边形里面的人手轮廓点肯定不是凸包上的点, 因此, 可以将这些点剔除, 再进行 Graham 扫描。图 4(a) 的人手二值图像大小为  $320 \text{ pixel} \times 240 \text{ pixel}$ , 轮廓上的像素总共有 1 112 个。经过筛选后, 被剔除的像素多达 860 个, 被剔除的像素如图 4(b) 箭头所示, 剔除率为 77.3%, 对提高 Graham 扫描算法的效率有明显改善。



(a) 人手二值图像 (b) 射线扫描

(a) Binary image of human hand (b) Ray scanning



(c) 分区优化 (d) 凸包计算结果

(c) Partition optimizing (d) Result of convex hull computation

图 4 凸包计算

Fig. 4 Convex hull calculation

这里还有一个关键问题是如何快速判断待检测点是否在  $LTRB$  四边形内部, 本文提出射线扫描法进行判断, 算法描述如下:

(a) 假设 4 个顶点的坐标分别为:  $L(x_L, y_L)$ 、 $R(x_R, y_R)$ 、 $T(x_T, y_T)$  和  $B(x_B, y_B)$ , 由 4 个顶点坐标很容易构造  $LT$ 、 $TR$ 、 $BR$  和  $LB$  的直线方程, 如其中一条直线  $LB$  的方程可表示为:

$$\frac{x - x_L}{x_B - x_L} = \frac{y - y_L}{y_B - y_L} \quad (3)$$

(b) 以待观测点  $P(x_p, y_p)$  为射线端点, 沿着

与横坐标轴平行的某一方向作射线, 如图 4(b) 中以  $P_1$  和  $P_2$  为端点向右作射线, 然后求射线与  $LT$ 、 $TR$ 、 $BR$  和  $LB$  4 条直线的交点。不难证明, 如果交点数为奇数, 则待观测点  $P(x_p, y_p)$  在  $LTRB$  四边形内部; 如果交点数为偶数, 则待观测点  $P(x_p, y_p)$  在  $LTRB$  四边形外部。如图 4(b) 所示, 以  $P_1$  为端点的向右射线只与  $BR$  有一个交点  $J_{11}$ , 它在四边形内部; 而以  $P_2$  为端点的向右射线与四边形有两个交点  $J_{21}$  和  $J_{22}$ , 它在四边形外部。

(c) 为进一步减小 DSP 的计算量, 按照如图 4(c) 所示, 根据纵坐标值的大小将整幅图像分为 I、II 和 III 区。如果待观测点  $P(x_p, y_p)$  位于 I 区, 只需要和  $LT$ 、 $TR$  两条直线求交点; 如果待观测点  $P(x_p, y_p)$  位于 II 区, 只需要和  $LB$ 、 $TR$  两条直线求交点; 以此类推, 如果待观测点  $P(x_p, y_p)$  位于 III 区, 就和  $LB$ 、 $BR$  两条直线求交点。当然如果  $L$  和  $R$  两点的纵坐标值相同, 则 II 区不存在, 计算方法类似。采取这种分区优化措施后, 对每一个待测点来说比优化前节省了计算两次交点的运算量。

在上述算法中, DSP 只执行加法、减法和乘法运算, 没有除法和其它非线性复杂运算, 易于实现。经过上述射线扫描法筛选后, 再对剩下的少数点集应用经典 Graham 扫描算法进行凸包求解<sup>[16]</sup>, 求解结果如图 4(d) 所示。

### 3.2 指尖定位

目前指尖定位算法主要包括模板匹配方法和轮廓分析方法两大类。模板匹配方法需要滑动模板遍历图像进行匹配<sup>[17-18]</sup>, 效率不高。轮廓分析方法是根据手指边缘轮廓的几何特征进行指尖定位, 主要有最小二乘椭圆拟合方法<sup>[19]</sup>、粒子滤波法<sup>[20]</sup>、型值点格式化法<sup>[21]</sup>等, 此类方法虽然简单, 但对轮廓精度要求较高。本文提出基于凸包的曲率特征分析方法, 根据手指轮廓凸点的弯曲特征实现指尖定位, 原理如图 5 所示。

首先在手指轮廓上任选一点  $P(x, y)$ , 再在点  $P(x, y)$  左右两侧等步长(根据实验测试, 步长取 30 个像素比较合适)分别选取点  $P_1(x_1, y_1)$  和点  $P_2(x_2, y_2)$ ; 然后计算  $P_1P$  和  $PP_2$  的中垂线  $L_1, L_2$ ,  $L_1$  和  $L_2$  相交点  $O(x_0, y_0)$  即为过  $P(x, y)$ 、 $P_1(x_1, y_1)$  和  $P_2(x_2, y_2)$  3 点所构成圆的圆心; 最后计算圆心  $O(x_0, y_0)$  与  $P(x, y)$  的距离即为圆的半径  $r$ , 用此半径  $r$  来表征被测点  $P(x, y)$

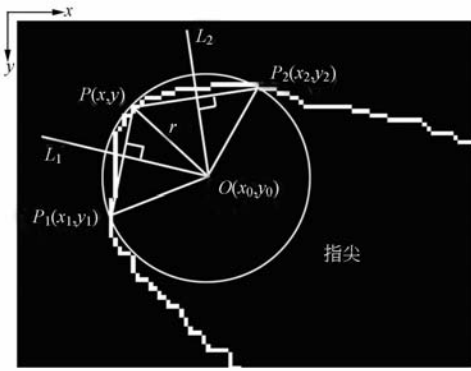


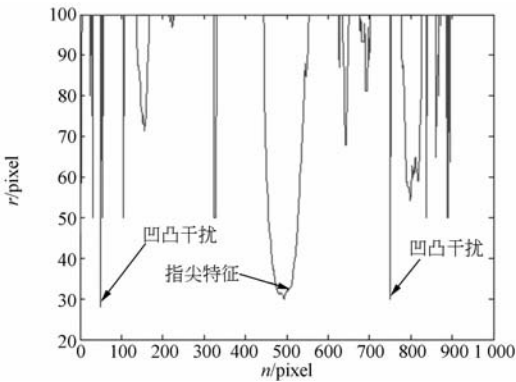
图 5 手指轮廓半径计算

Fig. 5 Radius computation of finger outline

按照同样的方法计算图 4(d)中各凸点的半径  $r$ , 根据其半径分布曲线图 6(b)可以发现人手指尖特征非常明显,有效排除了锯齿干扰,这也是前面对人手轮廓计算凸点的重要原因之一。根据实验测试只要满足  $r < 35$  pixel 的点即可认定为是指尖部位。

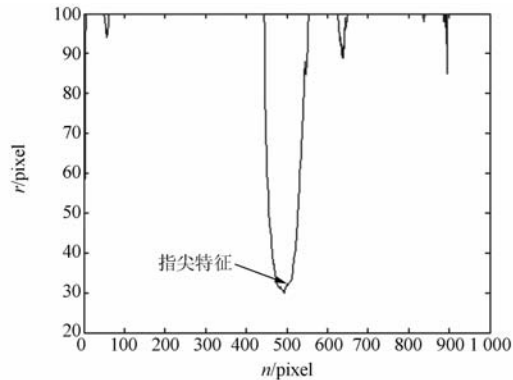
### 4 实验结果与分析

为验证指尖检测与定位算法的正确性,基于清华大学图像识别与高速图像处理实验室研制的 NIPC-3e 嵌入式领域图像并行处理机设计了如图 7(a)所示的便携式手指交互平台,结构如图 7(b)所示<sup>[22]</sup>。系统选用 YUCOO-C5011A 微型摄像机采集人手图像,经 SAA7113A/D 转换输出的数字视频信号送入 DSP 和 FPGA,完成系统标定、人手分割、指尖检测等运算以及执行用户应用程序。高清摄像机主要用于人脸检测、目标跟踪等用户应用程序中的高清图像采集,东芝 21.2 cm 工业 TFT-LCD 可以显示手指交互信息和用户应用程序执行结果。



(a) 人手轮廓半径分布图

(a) Radius distribution of hand outline

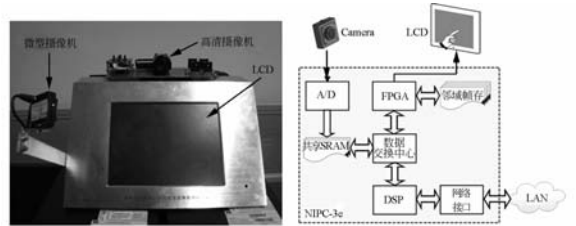


(b) 人手凸包半径分布图

(b) Radius distribution of convex hull

图 6 轮廓和凸包的半径分布图

Fig. 6 Radius distributions of outline and convex hull

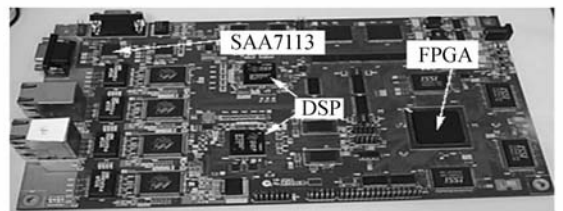


(a) 实物图

(b) 系统结构图

(a) Actual figure

(b) Structure of system



(c) NIPC-3e

(c) NIPC-3e

图 7 硬件系统

Fig. 7 Hardware system

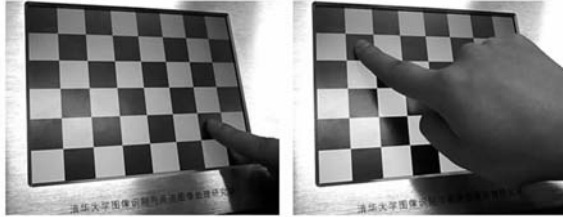
的弯曲特征。按照此方法计算图 4(a)人手轮廓各点半径  $r$ ,其半径分布曲线如图 6(a)所示。由于图 4(a)人手轮廓存在锯齿,对指尖的判断容易造成干扰,可能会导致指尖的误判断。但是如果

为测试系统性能,设计了如下实验策略:首先对不同位置、不同形状、不同数量的手指进行检测试验,其次对手指在 LCD 屏幕上的点击进行测

试,然后使用手指交互系统与嵌入式高清人脸检测系统进行交互控制应用测试,最后对不同指尖检测方法的误差和耗时进行了比较与分析。

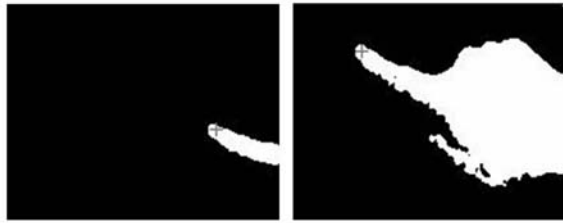
#### 4.1 指尖检测实验

首先进行手指不同位置的检测实验,图 8(a)和图 8(b)所示分别为从图像序列中随机提取的第 210 帧和第 302 帧手指图像,手指在两帧图像



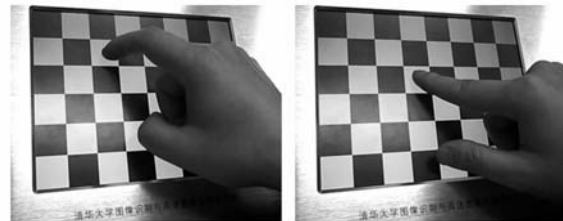
(a)第 210 帧图像  
(a) Frame 210

(b)第 302 帧图像  
(b) Frame 302



(c)(a)图的指尖检测结果  
(c) Detection result of (a)

(d)(b)图的指尖检测结果  
(d) Detection result of (b)



(e)弯曲手指图像  
(e) Image of crooked finger

(f)多手指图像  
(f) Image of many fingers



(g)(e)图的指尖检测结果  
(g) Detection result of (e)

(h)(f)图的指尖检测结果  
(h) Detection result of (f)

图 8 指尖检测结果

Fig. 8 Results of fingertip detection

像中处于不同位置,其指尖检测结果分别如图 8(c)和图 8(d)所示;然后对图 8(e)所示弯曲手指图像进行指尖检测实验,其检测结果如图 8(g)所示;最后对图 8(f)所示存在非目标手指(大拇指)干扰的图像进行指尖检测实验,其检测结果如图 8(h)所示。上述指尖检测结果在图中用“+”进行了标注。经过大量实验测试表明,对自然伸展的单手指正确检测率为 95.2%,对弯曲单手指的正确检测率为 92.6%,对在非目标手指干扰下的正确检测率为 90.1%,结果表明指尖检测算法具有较好的鲁棒性。

#### 4.2 指尖点击实验

对于单摄像机,它所能获取的是物体的平面信息,无法获取手指的深度信息,因此基于单摄像机手指交互技术的另一个难题在于如何判断指尖与屏幕的接触信息。文献[23]对颜色标注指尖的搜索框法和深度提取法判断指尖的点击动作进行了研究,但检测精度受姿态影响较大,并且需要对指尖进行颜色标注,使用不方便。本文对手指点击屏幕动作进行了分析,提出多帧对比法进行点击判断。基本思路是判断连续多帧指尖的移动范围,如果指尖移动范围保持在  $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$  邻域内即判断为点击,否则为非点击。为得到合适的连续判断帧数,进行了多帧点击对比实验,实验数据如表 1 所示。

表 1 多帧对比测试数据

Tab. 1 Data of may frame comparison test

| 连续帧数 | 点击次数 | 成功次数 | 正确率/% |
|------|------|------|-------|
| 1    | 50   | 23   | 46    |
| 2    | 50   | 33   | 66    |
| 3    | 50   | 36   | 72    |
| 4    | 50   | 49   | 98    |
| 5    | 50   | 50   | 100   |
| 6    | 50   | 50   | 100   |
| 7    | 50   | 50   | 100   |
| 8    | 50   | 49   | 98    |
| 9    | 50   | 48   | 96    |
| 10   | 50   | 48   | 96    |
| 11   | 50   | 47   | 94    |
| 12   | 50   | 43   | 92    |

分析表 1 中的数据可知:当连续判断帧数小于 4 frame 时,点击操作正确率比较低;当连续判

断帧数超过 4 frame 时,点击操作正确率比较高。但是如果连续判断帧数取得太大,会影响到系统的实时性。因此综合考虑操作成功率和实时性等因素,系统判断指尖点击的策略为如果连续 5 frame 指尖移动范围保持在 5 pixel×5 pixel 邻域范围内即判断为点击,此时一次完整的指尖点击坐标测量大约需要 23 ms。多帧对比法简单易行,取得了比较好的点击检测效果,同时对指尖点击也起到了去抖动的作用,减少了点击误动作。

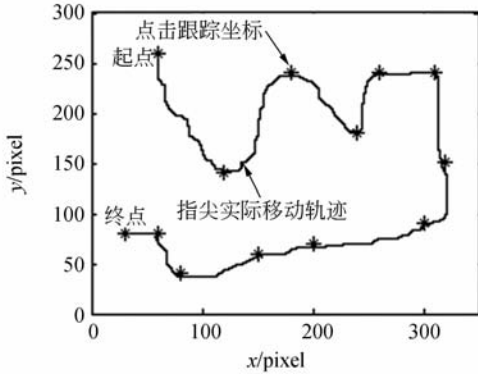


图 9 指尖点击测试

Fig. 9 Fingertip click test

接下来进行点击准确度实验,如图 9 所示。用手指在屏幕上的不同位置连续点击,对系统自动跟踪所获取的点击位置坐标与人工标定的实际坐标进行比较,测量的坐标值如表 2 所示,计算的误差结果为: X、Y 坐标的算术平均误差分别为 0.46 和 0.62 pixel; 均方差分别为 3.82 和 3.2

表 2 点击测试数据

Tab. 2 Data of click test (pixel)

| 编号 | 标定值   |       | 检测值   |       |
|----|-------|-------|-------|-------|
|    | $X_1$ | $Y_1$ | $X_2$ | $Y_2$ |
| 1  | 30    | 80    | 35    | 85    |
| 2  | 60    | 80    | 58    | 83    |
| 3  | 80    | 40    | 81    | 40    |
| 4  | 150   | 60    | 152   | 59    |
| 5  | 200   | 70    | 198   | 66    |
| 6  | 300   | 90    | 308   | 93    |
| 7  | 320   | 150   | 214   | 155   |
| 8  | 310   | 240   | 205   | 235   |
| 9  | 260   | 240   | 262   | 237   |
| 10 | 240   | 180   | 241   | 180   |
| 11 | 180   | 240   | 179   | 242   |
| 12 | 120   | 140   | 120   | 141   |
| 13 | 60    | 260   | 63    | 262   |

pixel。按照表 2 中最大 8 pixel 的偏差来计算,系统检测的点击位置与实际位置最大偏移量为 2.12 mm,能满足常用手指交互技术的精度要求。

### 4.3 交互应用实验

为测试系统实际应用的效果,将手指交互系统与高清人脸检测系统连接,在主菜单中设计“采集”、“人脸检测”、“跟踪”和“标定”4 个按钮用于不同任务的交互操作:点击“采集”按钮时高清摄像机实时采集现场图像;点击“人脸检测”按钮时检测现场视频中的人脸,并归一化为 360×480 大小的人脸图像,显示在 LCD 上;点击“跟踪”按钮时对运动目标中的指定位置进行自动跟踪;点击“标定”时系统使用 LCD 屏幕显示的黑白相间方格图对摄像机进行标定。实验结果如图 10 所示。



(a) 高清图像采集

(b) 人脸检测

(a) HD image capture

(b) Human face detection

图 10 交互测试结果

Fig. 10 Results of interactive test

### 4.4 不同指尖检测方法误差和耗时比较

为测试本文算法的性能,将常用的不同指尖检测算法进行了对比实验,测试其检测误差和总的耗时。表 3 中记录了本文算法对一帧分辨率为 320×240 图像进行指尖检测过程平均所消耗的时间。表 4 中记录了本文算法与其它算法检测指尖的误差和总的耗时。根据结果可知,基于轮廓的分析方法相对模板匹配方法的检测精度高、速度快。本文指尖检测算法的定位精度和时间效率都较高,系统指尖检测的总耗时约为 11.2 ms,完成一次指尖点击定位总耗时约为 23 ms,对运动的指尖能实时进行跟踪定位。

表 3 指尖检测过程平均耗时统计

Tab. 3 Processing time for fingertip detection (ms)

| 分辨率     | 肤色分割 | 凸包计算 | 曲率计算 | 指尖检测<br>总耗时 |
|---------|------|------|------|-------------|
| 320×240 | 0.5  | 8.1  | 2.6  | 11.2        |

表 4 不同算法指尖检测误差和耗时比较

Tab. 4 Errors and time for different fingertip detection methods

| 指尖检测算法  | 最大误差/pixel | 耗时/ms |
|---------|------------|-------|
| 粒子滤波法   | 13         | 21    |
| 模板匹配法   | 11         | 25    |
| 椭圆拟合法   | 7          | 8.1   |
| 型值点格式化法 | 6          | 3.8   |
| 本文算法    | 8          | 2.6   |

上述实验结果表明,提出的系统可以对手指进行准确跟踪,完成比较精确的指尖定位,能够快速响应指尖的点击操作,实现了嵌入式系统的手指交互操作。

## 5 结 论

根据便携式设备人机交互实时性好、可靠性

高的要求,提出了基于 DSP 和 FPGA 的单目视觉嵌入式快速手指交互方法。研究了人手分割算法,并对经典 Graham 扫描求凸包的算法进行了改进。最后,给出了指尖检测算法以及点击判断方法。实验结果表明:对自然伸展的单手指正确检测率为 95.2%,对弯曲手指的正确检测率为 92.6%,对在非目标手指干扰下的正确检测率为 90.1%;对指尖的定位最大偏移量为 2.12 mm,指尖定位总耗时约为 23 ms。系统稳定可靠、自然、友好,能满足实时要求。

目前,系统实现的功能主要是指尖的跟踪、定位与点击坐标测量,后续将在嵌入式平台上对非接触式虚拟屏幕人机交互和复杂手势识别等方面进行研究,构建更加智能化、人性化,更加自然、高效的嵌入式人机交互系统。

## 参考文献:

- [1] 金连文,徐睿,杨端端,等. 手指书写:一种虚拟文字识别人机交互新方法[J]. 电子学报,2007,35(3):396-401.  
JIN L W, XU R, YANG D D, *et al.*. Finger writing: a novel virtual character recognition HCI approach[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2007, 35(3):396-401. (in Chinese)
- [2] 孙丽娟,张立材,郭彩龙. 基于视觉的手势识别技术[J]. 计算机技术与发展,2008,18(10):214-221.  
SUN L J, ZHANG L C, GUO C L. Technologies of hand gesture recognition based on vision[J]. *Computer Technology and Development*, 2008, 18(10):214-221. (in Chinese)
- [3] 周佳,王毅,刘军发,等. 基于手势数据分析的地方手语动画合成方法研究[J]. 计算机应用研究,2011,28(2):779-781.  
ZHOU J, WANG Y, LIU J F, *et al.*. Dialect sign language animation synthesis on gesture data analysis[J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(2):779-781. (in Chinese)
- [4] 苑玮琦,朱春艳,柯丽. 手指宽度选取与识别率对应关系分析[J]. 光学 精密工程,2009,17(7):1730-1736.  
YUAN W Q, ZHU CH Y, KE L. Analysis of relationship between finger width and recognition rate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7):1730-1736. (in Chinese)
- [5] 陈一民,张云华. 基于手势识别的机器人人机交互技术研究[J]. 机器人,2009,31(4):351-356.  
CHEN Y M, ZHANG Y H. Research on human-robot interaction technique based on hand gesture recognition[J]. *Robot*, 2009, 31(4):351-356. (in Chinese)
- [6] SUSHMITA M, TINKU A. Gesture recognition: a survey[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—PART C: Applications and Reviews*, 2007, 37(3):311-324.
- [7] ZHAO SH Y, TAN W J, WU CH D, *et al.*. A novel interactive method of virtual reality system based on hand gesture recognition [C]. *Proceedings of 2009 Chinese Control and Decision Conference, Guilin, P. R. China: CCDC*, 2009:5879-5882.
- [8] 孙培,苏群星,刘鹏远. 虚拟维修仿真中手势识别的研究与应用[J]. 计算机仿真,2009,26(6):277-303.  
SUN P, SU Q X, LIU P Y. Study and application of gesture recognition in virtual maintenance simulation[J]. *Computer Simulation*, 2009, 26(6):277-303. (in Chinese)
- [9] 盛君,王毅刚. 基于 ARToolKit 手指交互系统的研究[J]. 机电工程,2010,27(6):116-119.

- SHENG J, WANG Y Q. Research on finger interactive system based on ARToolKit[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2010, 27(6):116-119. (in Chinese)
- [10] 任海兵,祝远新,徐光,等. 基于视觉手势识别的研究—综述[J]. *电子学报*, 2000, 28(2):118-121.  
REN H B, ZHU Y X, XU G, *et al.*. Vision-based recognition of hand gestures: a survey[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2000, 28(2):118-121. (in Chinese)
- [11] ZARIT B D, SUPER B J, QUEK F K H. Comparison of five color models in skin pixel classification [C]. *International Workshop on Recognition, Analysis and Tracking of Faces and Gestures in Real-Time Systems, Corfu, Greece: RATFG-RTS*, 1999:58-63.
- [12] 苑玮琦,赵继忠,刘博,等. 掌纹图像采集装置的研制[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(10):2555-2560.  
YUAN W Q, ZHAO J ZH, LIU B, *et al.*. Development of palm-print image sampling equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10):2555-2560. (in Chinese)
- [13] 张坤华,杨烜. 应用聚类 and 分形实现复杂背景下的扩展目标分割[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7):1665-1671.  
ZHANG K H, YANG H. Segmentation for extended target in complex backgrounds based on clustering and fractal[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7):1665-1671. (in Chinese)
- [14] WATANOBÉ Y, YOSHIOKA R, TSUKUMOTO S, *et al.*. Filmification of methods: Convex Hull algorithms [C]. *IEEE Region 10 Conference, Singapore: TENCON*, 2009:1-6.
- [15] 鲁剑,刘志. 基于改进凸包算法的移动端条码图像定位与校正[J]. *浙江工业大学学报*, 2010, 38(6):661-665.  
LU J, LIU ZH. An approach for smart phone barcode positioning and correction based on an improved convex hull algorithm [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2010, 38(6):661-665. (in Chinese)
- [16] LEE D T. On finding the convex hull of a simple polygon[J]. *International Journal of Computer & Information Sciences*, 1983, 12(2):87-98.
- [17] 杨端端,金连文,尹俊勋. 手指书写汉字识别系统中的指尖检测方法[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(1):58-63.  
YANG D D, JIN L W, YIN J X. Fingertip detection approach for finger-writing chinese character recognition system [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 35(1):58-63. (in Chinese)
- [18] 贾建军. 基于视觉的手势识别技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.  
JIA J J. *Research on vision-based gesture recognition technology* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [19] TAEHEE L, TOBIAS H, HANDY A R. Markerless inspection of augmented reality objects using fingertip tracking [C]. *IEEE 11th International Symposium on Wearable Computers, Boston, USA: ISWC*, 2007:83-90.
- [20] 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):2235-2240.  
XU Y H, LI SH Q, JIA Y D. A vision-based method for finger-screen interaction [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(11):2235-2240. (in Chinese)
- [21] 汤勇,顾宏斌,周来. 交互系统中实时手势分割及指尖检测方法[J]. *光电工程*, 2010, 37(7):145-150.  
TANG Y, GU H B, ZHOU L. Real-time hand segmentation and fingertip detection for interaction [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(7):145-150. (in Chinese)
- [22] SU G D, LIU J X, YAN S, *et al.*. Theory and application of image neighborhood parallel processing [C]. *IEEE 16th International Conference on Image Processing, Cairo, Egypt: ICIP*, 2009:2313-2316.
- [23] 黄菁. 基于单目视觉的触摸屏技术研究[D]. 杭州:浙江工商大学, 2009.  
HUANG Q. *Researches on monocular vision-based touch screen technology* [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2009. (in Chinese)

## 作者简介:



**向守兵**(1973—),男,四川德阳人,副教授,2007年于西南交通大学获得硕士学位,现为四川工程职业技术学院电气信息工程系副主任,2010年中组部“西部之光”清华大学访问学者,主要从事图像处理及模式识别方面的研究。E-mail: 8255@secetc.net



**吉倩倩**(1986—),女,安徽蚌埠人,硕士研究生,2008年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事目标跟踪算法及其硬件实现方面的研究。E-mail: jqqwts@mail.ustc.edu.cn



**苏光大**(1948—),男,重庆人,教授,1977年毕业于清华大学电子系,现为清华大学-深思洛克图像识别与高速图像处理联合研究中心主任,主要从事图像识别和高速图像处理方面的研究。E-mail: susu@tsinghua.edu.cn



**方飞**(1989—),女,江苏常州人,清华大学电子工程系学生,研究方向为智能人机交互。E-mail: fangfeiff123@gmail.com



**任小龙**(1983—),男,陕西西安人,工程师,2009年于清华大学获得硕士学位,主要从事人脸识别算法和硬件实现方面的研究。E-mail: littledragonren@sina.com

## ● 下期预告

## 多振子压电发电机的输出特性

阚君武<sup>1</sup>, 王淑云<sup>2</sup>, 彭少锋<sup>3</sup>, 张忠华<sup>1</sup>, 曾平<sup>1</sup>, 程光明<sup>1</sup>, 付晓庆<sup>3</sup>

(1. 浙江师范大学精密机械研究所, 浙江 金华 321004;

2. 浙江大学数理信息学院, 浙江 金华 321004; 3. 吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

为提高多振子压电发电机的输出能力及有效频带宽度,从理论及试验两方面研究了各压电振子直接串/并联及经整流桥串/并联时的输出电压特性。结果表明,各压电振子经整流桥串/并联输出的电压及频带宽度均优于直接串/并联输出的电压及频带宽度,且各压电振子经整流桥串联输出方式优于并联输出方式。压电振子结构及数量相同时,经整流桥串联输出电压的幅值及频率范围分别大于经整流桥并联的输出电压和频带宽度,且电压波动较小。制作了3个压电振子构成的发电装置,并进行了压电振子不同连接方式时的输出电压对比试验。各压电振子独立发电产生高于10 V电压的频率段分别为143.1~148.1 Hz, 160~166.2 Hz, 173.1~184.3 Hz,而经整流桥串联输出10 V电压时的连续频率段增至141.8~190 Hz。