

一种基于多级并行处理器的高速 实时手势识别及指尖轨迹追踪系统

龙希田, 石 匆, 杨 杰, 吴南健

(中国科学院半导体研究所 超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 提出一种基于多级并行处理器的实时手势识别及指尖轨迹追踪系统. 该系统包含 64×64 处理单元(PE)阵列, 64 个精简指令集(RISC)构架的协处理器组, 以及一个 RISC 微处理器. PE 阵列实现对原始图像数据的噪声消除、平滑滤波、形态学处理等预处理, 协处理器组用于完成对预处理后图像的特征统计、提取, RISC 中央处理器则用于对整个系统进行控制, 完成复杂的数学运算, 以及与系统外界进行交互的工作. 该系统使用 FPGA 实现. 由于采用多级并行处理器构架, 使系统的运算处理能力大大提高. 试验结果表明, 本系统具有良好的鲁棒性, 并且满足实时手势识别、指尖轨迹追踪的要求.

关键词: 手势识别; 指尖追踪; FPGA; 并行; 精简指令集

中图分类号: TP391.41; TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)12-0090-07

A Hand Gesture Recognition and Fingertip Tracking System Based on Multiple Levels of Parallel Processors

LONG Xi-tian, SHI Cong, YANG Jie, WU Nan-jian

(State Key Laboratory of Super lattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper proposes hand gesture recognition and fingertip tracking system based on multiple levels of processors. The system contains a 64×64 Processing Elements (PE) array, a coprocessor group consists of 64 coprocessors and a RISC CPU. The PE array can carry out noise cancelation, smooth filtering, and image morphology. The coprocessor group is responsible for feature statistics and feature extraction. The RISC CPU controls the whole system and is capable of conducting complex arithmetic operations. It can also perform data exchange with other systems. The proposed system is implemented in FPGA. Due to its multiple level processors architecture the processing rate is significantly improved. Experiments demonstrated that our proposed system has good robustness and fully satisfy the real-time hand gesture recognition and finger-tip tracking requirement.

Key words: hand gesture recognition; finger-tip tracking; FPGA; parallel; RISC

1 引言

手势作为人类最为原始的交流方式之一, 因其具有直观性、自然性等特点, 已经成为人机交互的一种重要手段. 基于手势的人机交互系统更加符合人类自然习惯, 并且可以在不接触设备的情况下对设

备进行控制, 因此具有广泛的应用前景. 目前使用手势进行人机交互的设备或软件, 普遍存在反应时间长, 实时性不高等问题, 因此很难获得良好的用户体验. 关于手势识别的研究往往集中在软件算法领域, 硬件实现寥寥可数. 有些基于图像的手势识别硬件系统虽然一定程度上实现了手势识别的功能, 但是,

收稿日期: 2013-02-23; 修回日期: 2013-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(61234003); 国家重点基础研究发展计划(2011CB932900)

在图像处理阶段仍采用串行的方式逐一对像素进行处理,大大限制了整个系统的处理速度和效率.视觉芯片采用大规模并行的处理单元阵列对整个原始图像或者某区域图像进行并行处理,可以实现数千帧每秒的高速图像处理^[1-3],然而这种结构灵活性不足,实时完成高级图像处理困难,限制了实际应用^[4].在视觉芯片的基础上加入精简指令集(RISC)微处理器,使高级算法处理能力得到加强,可以实现实时车道线检测.

本文提出一种多级并行处理器的实时手势识别和指尖追踪系统.该系统主要包括一个 64×64 二维处理单元(PE)阵列,64个基于RISC构架简化的协处理器,以及一个RISC微处理器. PE阵列对原始图像完成如噪声消除、平滑滤波、边缘检测、形态学处理等进行像素级并行的预处理;协处理器组则可以并行完成对图像多个区域的特征统计、提取等中级图像处理算法. RISC微处理器则对整个系统进行控制,并负责完成部分高级算法以及和外部进行通信的工作.

2 手势识别及指尖追踪系统构架

如图1所示,为本文提出的高速手势识别系统构架,此构架由RISC微处理器、系统总线、以及 64×64 PE二维阵列、64个简化后RISC处理器组成的协处理器组、阵列控制器、图像传感器接口、图像传感器、计算机(PC)平台组成. PE阵列采用单指令多数据(SIMD)的方式组成大规模并行的二维阵列,极大地提高了系统的吞吐量(Throughput),使得手势识别中如滤波、平滑、去噪、背景减除等低级算法得以快速完成.每个协处理器,具备完成中级数据统计、较复杂运算能力. RISC核则负责整个系统的控制,与外界的交互,并完成协处理器无法完成的部分高级算法.系统总线则用于系统各个部件之间的数据、命令交互,最后处理所得结果和数据将通过专门开发的软件界面显示在PC平台上.

本系统的设计充分考虑数字图像处理的特点,针对图像处理中的预处理、中级、高级算法进行优化.预处理算法往往涉及整个图像的原始数据,数据量极大,普通处理器仅仅是存取这些数据就将耗费大量时间.但是,预处理算法处理也呈现出规律性,大量的预处理算法仅仅对像素的邻近区域进行简单的权重因子加减、逻辑运算,具有极高的数据级并行性.为了系统能够高速实时进行手势原始数据的预处理,本文采用大规模并行的PE阵列来进行图像

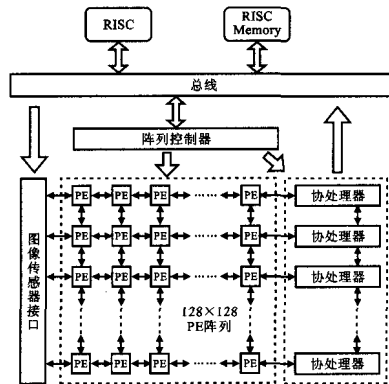


图1 手势识别及指尖追踪实时系统构架

预处理,提高了图像预处理的数据吞吐量,使处理速度大大提高.中级处理是基于预处理结果来进行的,运算复杂程度显著提高.中级处理往往是针对图像的一个较大区域来进行统计、提取特征信息.每个协处理器采用简化后的RISC处理器组成,具有完成较复杂运算的能力,可以同时处理一行或者多行数据,可以满足中级处理的要求,RP阵列则同时并行处理图像的各个区域.中级处理之后数据量大大减小,算法上不存在并行性,这些数据往往需要经过变换、乘法、除法,甚至开方运算来最终得到手势特征,这些工作由一个完整的RISC微处理器来完成.

本系统充分考虑了图像处理各个阶段的特征,并对各个阶段进行相应的优化,使手势识别、指尖追踪算法得以在硬件上实现.其过程如下:首先,原始图像分块输入到PE处理器阵列中,PE阵列对图像进行预处理;然后,数据被送入协处理组中,每个协处理器同时对某一块的图像进行特征的统计、提取;最后,各个协处理器中的数据被送到RISC微处理器中,RISC微处理器通过对信息进行综合、筛选,对比以实现手势识别、指尖追踪.

3 模块设计与实现

3.1 PE阵列

如图2所示为PE结构及其电路实现. PE主要由1-bit算术逻辑单元(ALU)和一个64 bit存储器组成.该ALU含有一个由地址给出的第一操作数和由ALU内部的寄存器T_Reg提供的第二操作数,其中第一操作数从本PE存储器和邻近四个PE的存储器中通过多路选择器选取,第二操作数为隐含操作数,需通过ALU运算提前得到并存入T_Reg寄存器中.该1-bit ALU可以完成包括加、与、非、或四个基本操作,而通过对这四种基本操作进行不同的组合以及多周期重复,就可以实现任意比特

数据的加、减、绝对值、大小比较,甚至乘法等复杂的算术、逻辑运算.如图 3(a)所示,是 PE 完成一个 8bit 数并求绝对值的过程.首先利用符号位和各位进行异或操作,最后再将符号和数值位相加,得到该数的绝对值.图 3(b)中列表是 PE 完成典型的 8 位运算所消耗的周期数.

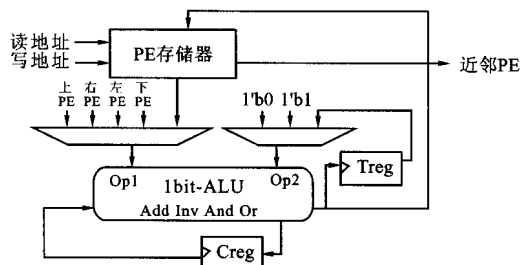


图 2 PE 电路结构

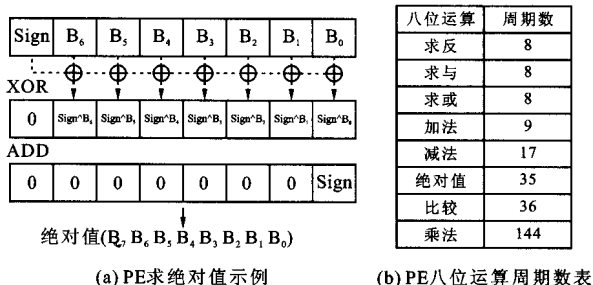


图 3 PE 完成复杂运算示例及常见八位运算周期数

PE 通过近邻输入端和上下左右的 PE 相互互连,构成二维阵列的形式,其中每个 PE 可以对应一个或者多个像素,从而 PE 阵列可以同时存放、处理高分辨率图像中的多个区域或者多个低分辨率图像.这种二维阵列形式被称为大规模并行单指令多数据构架,其特点是所有的 PE 接收相同的指令,进行相同的运算操作,从而极大地提高了单位时间运算量.图像处理中大部分预处理算法都可以利用 PE 阵列快速完成,从而大大地提高了系统响应速度.

3.2 协处理器组

协处理器由简化后的 RISC 组成一维阵列而构成,协处理器既可以接收来自 PE 的数据,也可以与相邻的协处理器之间进行数据交换.每个协处理器可以处理一个图像区域的数据,整个协处理器组则可以同时对图像的多个区域进行处理,实现了区域并行处理.本文在通用 RISC 处理器的基础上进行简化,剔除或者简化在中级图像处理中不使用、极少使用的硬件电路,在保证功能的基础上尽量减少资源开销.单个协处理器采用寄存器-存储器构架,可以对存储器进行寻址操作.协处理器主要由 ALU 单元、存储器单元、寄存器组组成. ALU 运算单元可以进行单字节、双字节加、减、大小比较、算术移位、

逻辑移位等运算.存储器可以存储预处理图像数据或者协处理器处理之后的数据.图 4 中展示了协处理器的电路结构图,所有的协处理器接收相同的指令,但是利用条件操作指令可以控制寄存器组中的条件寄存器,以实现每个协处理器中进行不同的运算操作.

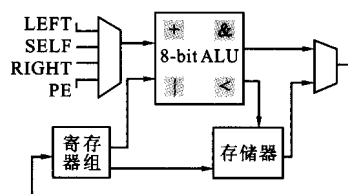


图 4 协处理器电路结构图

3.3 RISC 微处理器

RISC 微处理器包含一个完整的 32 位 RISC 核,程序、数据存储 RAM,它们之间通过简化后的总线相连.该 RISC 微处理器带有 32 位的 ALU,能够快速实现多种基本运算,并且配备 32×8 位的乘法单元,帮助快速完成乘法运算.该处理器采用经典的五级流水方式,经过取指令、指令解码、ALU 运算、存储器存取、写回完成一个完整的指令,它支持所有 RISC 指令,所以通过标准 C 语言和编译器可以对其进行复杂编程,以完成对系统各个模块的配置、控制以及部分复杂数学运算.

4 手势识别及指尖追踪并行处理的实现

4.1 图像预处理的并行实现

采用 HSV 肤色空间来进行手势的提取,是一种广泛被接受的方法^[5].这种方法的不足之处在于需要首先将原始的 RGB 空间的数据转换为 HSV 空间来处理,仅仅转换就涉及巨大的运算量,要做到实时处理对系统的运算能力具有很高的要求,即使普通的 PC 也难实现.手势作为整个场景中唯一的目标,在相对静止的背景下进行移动或者动作变换,结合本系统的高速特性,只需要不断地对原始图像利用预处理消除背景噪声,再进行背景减除,以及一些形态学方法,即可准确地实现手势位置的提取.算法中涉及的预处理以及背景减除都可以在 PE 阵列中并行高速实现.

图像平滑也称为“模糊处理”,是一项简单且使用频率很高的图像处理技术^[6].平滑处理最为常见的用途是减少图像上的噪声、失真,并消除图像的细节.在本文中,平滑的主要目的是模糊背景,在进行背景减除后能够更好地提取出手的位置,为后续的特征提取等中级图像处理做准备.

图像平滑一般都是通过使用平滑模板来完成的,模板运算的特点是每次模板运算只与一小块图像区域中的像素值相关,而与整个图像的信息无关,所以图像平滑运算具有极大的数据并行性,可以利用 PE 阵列来快速完成. 图像使用 $m \times n$ 大小的滤波器掩模 w 进行线性滤波的数学表达由下列式(1)给出,图 5 中展示了一个使用 PE 阵列快速完成 3×3 均值平滑滤波的过程,通过上下左右 4 个相邻像素的相加,在加上中间像素的四倍,并除以八,就得到了该点的平均值. PE 阵列可以利用如下操作快速实现该平滑:首先每个 PE 依次与其相邻的四个 PE 进行数据交换,得到相邻 PE 中的像素值并存储于当前 PE 中,然后对当前 PE 的像素值左移两位实现四倍运算,将所有值相加得到像素值之和,最后将得到的和右移 3 位,实现除八运算. 因为所有 PE 同时完成上述操作,所以当 1 个 PE 完成操作的时候,整个 PE 阵列就完成了对图像的平滑滤波处理. 如式(2)、式(3)所示,为图像预处理中广泛使用的高斯拉普拉斯算子、高斯平滑滤波的数学形式,经过如图 6(a)、(b)所示的分别对式(2)、式(3)的离散化之后,仍然可以利用类似上述方法在 PE 中进行实现.



图 5 图像平滑模板及 PE 阵列实现

$$g(x, y) = \sum_{s=-\frac{m-1}{2}}^{\frac{m-1}{2}} \sum_{t=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} w(s, t) f(x+s, y+t) \quad (1)$$

$$\nabla^2 G(x, y) = \left[\frac{x^2 + y^2 - 2\sigma^2}{\sigma^4} \right] e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

$$G(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

图 7 所示的二值形态学腐蚀与膨胀运算为形态学处理中的基本操作,其执行方法与平滑滤波相似,只需将滤波模板替换为结构元素,加法操作替换为与/或操作. 如图 8 所示,为利用 PE 阵列并行对手势图像进行平滑滤波、背景减除、形态学处理之后的效果图.

4.2 手势特征的并行提取

PE 阵列处理之后的预处理图像,通过使用协处理器组可以快速实现手势特征、指尖位置的提取. 本系统中,预处理后图像被分割为多个 4×4 小区域,在垂直方向上两个相邻的小区域有一个像素宽的交叠,在水平方向上,有 2 个像素的交叠,如图 9

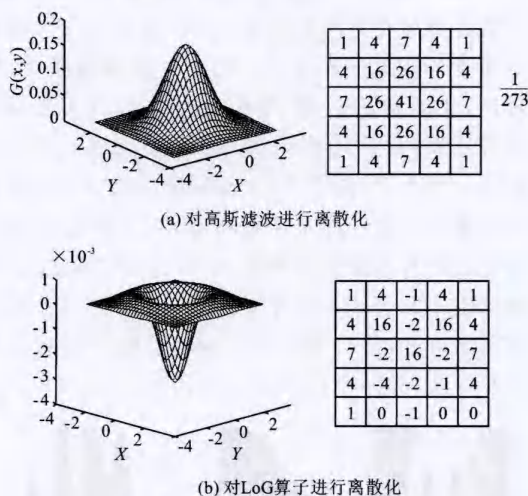


图 6 将复杂的数学形式离散化

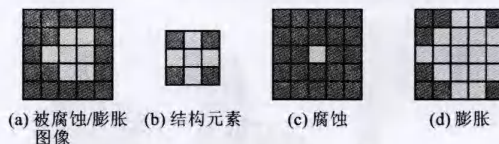


图 7 二值形态学腐蚀与膨胀操作运算



图 8 PE 阵列对原始图像进行平滑滤波、背景减除、形态学处理之后的效果图

所示. 各个小区域被并行输入各个协处理器中,由于采用这样的交叠处理,保证了特征信息不会因为处于某个图像区域的边缘而遗失. 本文利用每个小区域中的激活像素的个数判断该区域是否被激活,激活像素越多,那么这个区域就越有可能是手所在的区域.

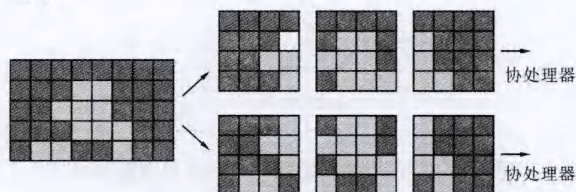


图 9 各个小区域之间的交叠

本文中,每个手势的特征由两个直方图来表示,每个激活区域的横坐标构成一个直方图,纵坐标构成另一直方图. 如图 10 所示,展示了几个典型手势的直方图组. 利用协处理器组,可以并行、快速地提取出这两组直方图. 当 64 个区域的数据被协处理器组并行处理完成之后,就可以使用如图 11 所示的

方式进行两组直方图的生成. 首先, 如果某个区域的激活像素个数大于 8, 那么认为这一区域被激活, 协处理器 i 中变量 Y_i 自增, 随后, 激活区域的 X 坐标在协处理器组中, 循环移动, 如果 X 坐标等于协处理器索引 i , 那么 X_i 自增. 64 次循环完成后, PE 阵列继续将剩余的数据传递至协处理器, 直至协处理器组处理完成所有的预处理图像. 整个过程完成之后, 协处理器组一共处理了相互交叠的 2 048 (64×32) 块图像区域, 同时并行提取出了两组手势特征直方图 $H_X[X1, X2, X3 \cdots X63], H_Y[Y1, Y2, Y3 \cdots Y63]$.

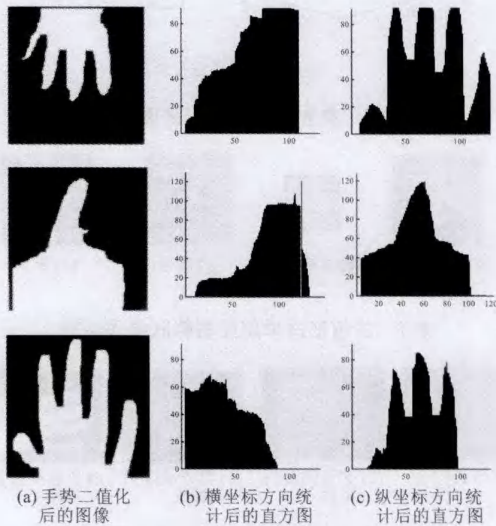


图 10 几种典型手势所对应的直方图

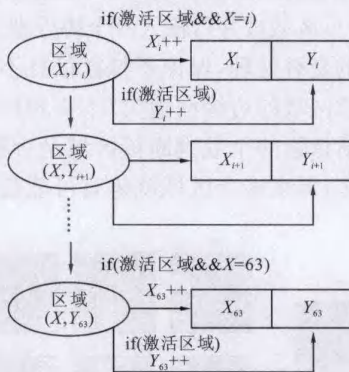


图 11 利用协处理器组完成特征直方图统计

4.3 手势识别和指尖追踪的实现

本文使用直方图匹配的方式来完成手势的识别, 由协处理器生成的手势直方图特征 H_X, H_Y 被送入 RISC 微处理器中和实验获得的多组手势直方图特征 H_{Xi}, H_{Yi} 使用式(4)的方式分别进行相似度对比^[5], 如果两个直方图的相似度越高, 计算得到的值就越接近于 1, 最后通过式(5)得到几何平均最大值所对应的手势则认为是当前检测到的手势.

$$d(H_X, H_{Xi}) = \frac{\sum_i (H_X(I) - \bar{H}_X)(H_{Xi}(I) - \bar{H}_{Xi})}{\sqrt{\sum_i (H_X(I) - \bar{H}_X)^2 \sum_i (H_{Xi}(I) - \bar{H}_{Xi})^2}}$$

$$d(H_Y, H_{Yi}) = \frac{\sum_i (H_Y(I) - \bar{H}_Y)(H_{Yi}(I) - \bar{H}_{Yi})}{\sqrt{\sum_i (H_Y(I) - \bar{H}_Y)^2 \sum_i (H_{Yi}(I) - \bar{H}_{Yi})^2}}$$

$$H_K = \frac{1}{N} \sum_J H_K(J)$$

$$\text{Max}(\sqrt{d(H_X, H_{X1})^2 + d(H_Y, H_{Y1})^2}, \sqrt{d(H_X, H_{X2})^2 + d(H_Y, H_{Y2})^2}, \dots, \sqrt{d(H_X, H_{Xi})^2 + d(H_Y, H_{Yi})^2}) \quad (5)$$

指尖轨迹的追踪仍然是借助协处理器所提取的特征以及 RISC 微处理器来完成的. 其算法流程图如图 12 所示. 在检测到单指的手势后, 认为可以开始追踪指尖轨迹, 因为通常情况下手指都是朝上的, 在指尖追踪开始的第一帧, 系统认为指尖的起始状态为整个图像的最高激活区域, 亦即 X 方向上的最大值和 Y 方向上首个非零值所对应的 X, Y 坐标亦即指尖的坐标, 对该坐标进行标定, 更新指尖的位置. 如果没有检测到符合条件的激活区域, 则重新开始指尖追踪程序, 如果检测到符合条件的激活区域, 则认为这个区域为指尖, 并更新指尖的坐标, 继续获取图像, 在刚刚更新的指尖坐标临近区域搜索激活区域, 并对这些激活区域进行统计, 其中联通激活区域最少的那个激活区域被认为是新的指尖位置并更新指尖位置, 如果存在多个激活区域的联通激活区域个数相同, 那么认为其中离前一帧指尖位置最近的一个区域为新的指尖区域.



图 12 指尖最终算法流程图

5 FPGA 实现及其实验结果

实验采用 Altera 公司的 Cyclone III EP3C120F484C, 资源使用如表 1 所示. 图 13、14 分别展示了手势识别、指尖追踪的实验结果, 图 15 为

整个系统的开发环境.其中图 13 中的字符 china 为指尖书写字母轨迹的追踪结果,结果显示该系统在较复杂背景下仍然能正确的识别手势和实现指尖的追踪,可见本文提出的基于多级并行处理器的系统具有很强的鲁棒性和适应性.表 2 所示为各个阶段算法所需的时间开销,以及各个部分所消耗的时间.表 3 中给出了本文和已有工作的对比,实验采用了和对比文献相同标准的 320×240 图像进行处理.由此可见本文提出的使用 PE 阵列、协处理器组以及 RISC 处理器的多级处理器构架大大提高了系统的

实时性.

表 1 FPGA 资源使用情况

FPGA	Cyclone III EP3C120F484C
运行频率/MHz	100 MHz
Logic Element	64 767/119 088(57%)
Memory Bits	909 320/3 981 312(23%)
Pin	40/284(14%)
PLL	1/4(25%)

表 2 各个阶段算法所使用指令数量

算法		处理 320×240 图像用时/ μ s	时间分布		
预处理	图像平滑	14	PE 100%	协处理器 0%	RISC 0%
	3×3 高斯平滑	14	PE 100%	协处理器 0%	RISC 0%
	5×5 高斯平滑	28	PE 100%	协处理器 0%	RISC 0%
	背景减除	3.8	PE 100%,	协处理器 0%	RISC 0%
	形态学开操作	3.2	PE 100%	协处理器 0%	RISC 0%
	形态学闭操作	3.2	PE 100%	协处理器 0%	RISC 0%
	特征直方图生成	1 568	PE 7.8%	协处理器 92.2%	RISC 0%
高级处理	手势识别	11 354.35~12 675.35	PE 1.7%	协处理器 12.73%	RISC 85.57%
	指尖追踪	9 392.35~10 166.37	PE 2.01%	协处理器 15.4%	RISC 82.59%

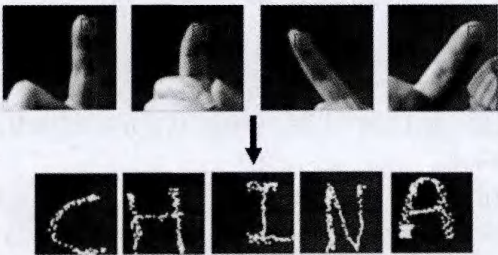


图 13 指尖追踪效果图

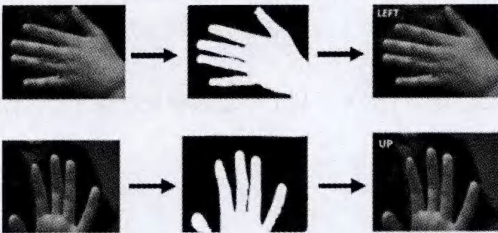


图 14 手势识别效果图

表 3 结果对比

研究成果	功能	硬件实现	处理速率
文献[7]	手势识别	PC	11 f/s
文献[8]	手势识别	PC	11 f/s
本文	手势识别+指尖追踪	多级并行处理器构架	78 f/s

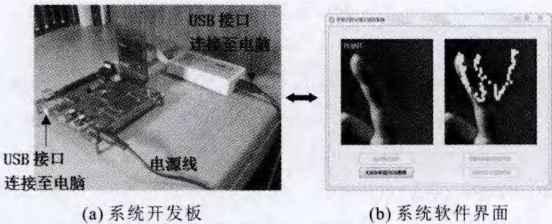


图 15 系统开发环境

6 结束语

本文提出了一种基于多级并行处理器的高速实时手势识别和指尖追踪系统,利用大规模并行的 PE 阵列和协处理器组解决了图像预处理和特征统计、特征提取的并行实现,使整个系统的处理速度大大提高.该系统使用 FPGA 实现,实验结果表明本系统具有较高的鲁棒性以及可靠性,并且追踪达到了 78 帧每秒的处理速度,完全满足实时手势识别、指尖追踪的需求,具有很大的现实应用价值.

参考文献:

[1] Lin Q Y, Miao W, Zhang W C, et al. A 1000 frames/s programmable vision chip with variable resolution

- and row-pixel-mixed parallel image processors [J]. Sensors, 2009, 9(S): 5933—5951.
- [2] Miao W, Lin Q Y, Zhang W C, et al. A programmable SIMD vision chip for real-time vision applications [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2008, 43(6): 1470-1479.
- [3] Zhang W C, Qiu Y F, Wu N J. A programmable vision chip based on multiple levels of parallel processors [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2011, 46(9): 2132-2147.
- [4] 李元金, 张万成, 吴南健. 一种基于并行处理器的快速车道线检测系统及 FPGA 实现[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2901-2906.
- [5] Gary Bradski, Adrian Kaebler. Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library [M]. O'REILLY. [s. n.], 2009: 227-231.
- [6] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 93-98.
- [7] Yikai Fang, Kongqiao Wang, Jian Cheng, et al. A real-time hand gesture recognition method[C]// IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Beijing: IEEE, 2007: 995-998.
- [8] Hardy Francke, Javier Ruiz-del-Solar, Rodrigo Verschae. Real-time hand gesture detection and recognition using boosted classifiers and active learning 11fps Advances in Image and Video Technology [C]// Proceedings of the Advances in Image and Video Technology, Second Pacific Symposium. Santiago, Chile: IEEE, 2007: 533-547.

作者简介:

龙希田 女, (1990—), 硕士生. 研究方向为集成电路设计及其高速图像处理.

石 匆 男, (1984—), 博士生. 研究方向为高速图像处理及集成电路设计.

杨 杰 男, (1987—), 博士生. 研究方向为高速图像处理及集成电路设计.

吴南健 男, (1961—), 博士, 博士生导师, 研究员. 研究方向包括数模混合集成电路、射频集成电路、超高速图像传感器、视觉芯片、RFID 等.

(上接第 89 页)

- [13] Osher S, Burger M, Goldfarb D, et al. An iterative regularization method for total variation-based image restoration[J]. Multiscale Model Simulation, 2005, 4(2): 460-489.
- [14] Yin W, Osher S, Goldfarb D, et al. Bregman iterative algorithms for l_1 -minimization with applications to compressed sensing [J]. SIAM J Imaging Sciences, 2008, 1(1): 143-168.
- [15] Goldstein T, Osher S. The split bregman method for l_1 -regularized problems [J]. SIAM J Imaging Sciences, 2009, 2(2): 323-343.
- [16] Zhang X, Burger M, Bresson X, et al. Bregman-ized nonlocal regularization for deconvolution and sparse reconstruction[J]. SIAM J Imaging Sciences, 2010, 3(3): 253-276.
- [17] 万保成. 分裂 Bregman 方法及其在图像处理中的应用 [D]. 吉林: 吉林大学, 2009.
- [18] 曹茂永, 孙农亮, 郁道银. 基于灰度梯度的数字图像评价函数[J]. 光电工程, 2003, 30(4): 69-72.

作者简介:

杨敬娴 女, (1988—), 硕士研究生. 研究方向为图像复原与相机驱动.

郭喜庆 男, (1972—), 博士, 研究员. 研究方向为光电载荷与光电成像、精密仪器光机电一体化设计.

孙鹏飞 男, (1985—), 硕士研究生. 研究方向为数值分析与算法设计.

韩文钦 男, (1987—), 硕士研究生. 研究方向为图形建模与光学信号检测.

解官宝 男, (1987—), 硕士研究生. 研究方向为光学成像与检测.