文章编号：1000-2618(2009)04-0420-05

【光电与信息工程】

基于 DM6446 平台的实时人眼检测系统

李玉文[1]，周家锐[2]，沈琳琳[2]

（1. 深圳信息职业技术学院，深圳 518029；2. 深圳大学计算机与软件学院，深圳 518060）

摘　要：基于高性能数字多媒体处理芯片 TI TMS320DM6446 的类 Haar 特征人眼检测算法. 通过将人眼检测算法封装为算法包并进行优化，实现基于 DM6446 平台的实时人眼检测系统. 封装后的算法包置于 DSP 端供远程调用. ARM 端的应用程序负责从摄像头采集人脸图像，并将结果输出到显示器. 人眼检测算法包也被应用于人脸识别系统中. 该算法具有搜索速度快、检测率高等优点，适合在便携式平台上实现. 实验结果表明，该实时人眼检测系统能在占用较少资源的情况下能有效检测并定位眼睛.

关键词：类 Haar 特征；人眼检测系统；DM6446；人脸识别系统

中图分类号：TP 273.5　　**文献标识码**：A

人眼检测是模式识别和计算机视觉领域的重要课题，有着广泛的应用价值[1]. 在人脸识别中，检测定位眼睛可有效抽取眼部特征，进而更精确定位脸部其他重要器官的位置. 此外，根据眼睛的位置及角度，可对人脸区域的选取进行修正，从而提升识别率，降低算法复杂度. 眼睛的检测和跟踪可用于安全监护、视频会议及司法鉴定等领域[2]. 但以上应用往往对便携性有所要求. 因此寻找一种高效的人眼检测算法，并将其在便携平台上实现具有现实意义.

自人眼检测课题提出以来，出现了很多实现算法. 2004 年 Dawtung LIN 等[3]提出基于脸圆拟合和黑像素滤波的人眼检测算法，获得了较好的检测效果. 2007 年 Huchuan LU 等[4]提出一种基于矩形特征和像素模式细节的眼睛检测算法，能有效确定眼睛的具体位置，但运算复杂. 2008 年 GuangYuan ZHANG 等[5]针对眼睛检测常需实时完成的特点，提出一种基于 SVM 的检测算法，但此方法检测率较低. 本文提出的基于类 Haar 特征的眼睛检测算法具有算法复杂度低、检测效率高的优点，适合于在芯片上实现.

TI TMS320DM6446 是美国德州仪器公司推出的高性能数字多媒体处理芯片，它包含 TMS320C64x+ 及 ARM926EJ 两个内核. 其中，C64x+ 的 DSP 内核运行频率最高可达 594 MHz，能有效处理大量数字多媒体信号. 而包含了嵌入式 Linux 系统的 ARM 核则能有效完成程序中的控制操作，并为片上软件的开发提供方便稳定的平台. 视频处理子系统（video processing subsystem）简化了数字视频信号的处理，使各种基于视频和图像的应用开发更方便. 本文选用 Spectrum Digital 公司的 DM6446 DVEVM 开发板作为基于类 Haar 特征的实时人眼检测系统的实现平台.

1　基于类 Haar 特征的人眼检测算法

类 Haar 特征是在物体识别中使用的一类数字图像特征，因其直观上类似 Haar 小波图像而得名. 图 1 为一组典型类 Haar 特征矩形图像.

Paul Viola 等人[6]提出使用 Haar 特征检测灰度图像中弱特征的方法，其后 Rainer Lienhart 等人[7]对算法进行扩展，添加了倾斜方向的类 Haar 特征，并将其应用于人脸检测. 本文介绍的基于类 Haar 特征的人眼检测算法就是将包括直线特征、边缘特征和中心特征在内的类 Haar 特征应用于灰度图像的人眼检测. 如图 2，通过比较 3 种典型特征与人

收稿日期：2009-01-14；**修回日期**：2009-06-11
基金项目：国家自然科学基金资助项目（60903112）；深圳市科技计划资助项目（CXQ2008019，JC200903120074A）
作者简介：李玉文（1965-），女（汉族），湖南省邵阳市人，深圳信息职业技术学院讲师. E-mail：ywli@sziit.com.cn
通讯作者：沈琳琳（1976-），男（汉族），深圳大学副教授、博士. E-mail：llshen@szu.edu.cn

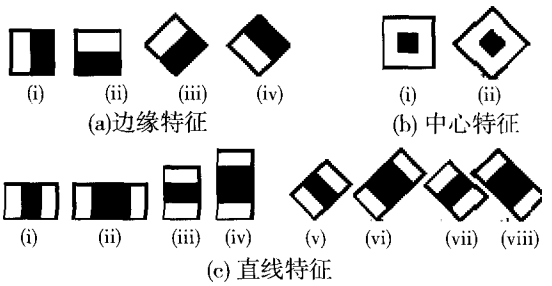


图 1　类 Haar 特征矩形

Fig. 1　Haar-like feature rectangles

眼图像可知，类 Haar 特征与人眼结构有许多相似之处，因此可进行有效地检测.

图 2　类 Haar 特征与人眼图像的对比

Fig. 2　Comparison of Haar-like features and eye image

算法将类 Haar 特征配合 AdaBoost 级联分类器进行人眼的搜索检测. 此时需要使用包含眼睛图像的正面样本及不含眼睛图像的反面样本对分类器进行训练，找出人眼图像在类 Haar 特征组上的典型分布，并记录于分类器参数中. 实际检测时，使用级联分类器对人脸图像进行分块搜索，检测每次输入的灰度图块是否符合人眼在特征组上的典型分布，从而判别图块中是否包含眼睛的存在.

考虑到面部器官具有相对稳定的位置分布，因此在搜索时只需分别搜索左右眼睛可能出现的区域即可，从而提高搜索效率. 经过对大量样本的观察统计可以发现，若以人脸图像左上方为坐标原点（0，0），并将图像高度和宽度归一化为 1，则左眼出现的区域约为（0，0）点到（0.6，0.6）点的矩形区域内，右眼为（0.4，0）点到（1，0.6）点的矩形区域内.

在搜索检测时，需先初始化截取图块的原始大小，再从人脸图像左上方到右下方逐格扫描截取图块进行判别. 若一轮扫描后无法检测到眼睛，则以特定比例放大截取图块的大小，进行新一轮搜索检测，直到检测到人眼或达到搜索失败的条件为止. 算法流程如图 3.

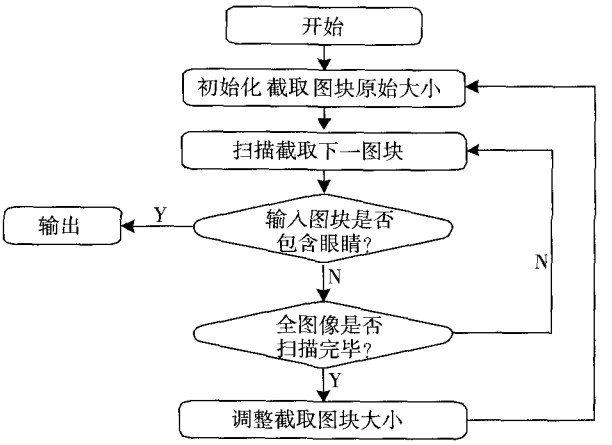


图 3　人眼检测算法流程

Fig. 3　Process of human eyes detection algorithm

2　检测系统在 DM6446 平台上的实现

TI TMS320DM6446 是一块高性能双核数字多媒体处理芯片. 其 ARM + DSP 的双核结构能对程序中控制和运算部分作有效区分，从而提高芯片执行效率，简化应用程序的开发难度. 由于 DM6446 平台强大的数字多媒体处理能力，特别是数字视频和图像处理能力，及其便于开发的特点，本文选用其作为基于类 Haar 特征的人眼识别算法的实现平台.

图 4 是 DM6446 的基本框架 CE framework. 其中，ARM 核上运行 MontaVista Linux 系统，DSP 核上运行 DSP/BIOS 系统，两端通过 DSP-Link 及共享内存空间进行交互. 应用程序运行于 ARM 端的应用层上，使用 Linux 分配的内存空间. 各种算法则依据 xDM-xDAIS 规范封装为算法包（codec），并挂载于 codec engine 上. 算法包既可在 Linux 端本地运

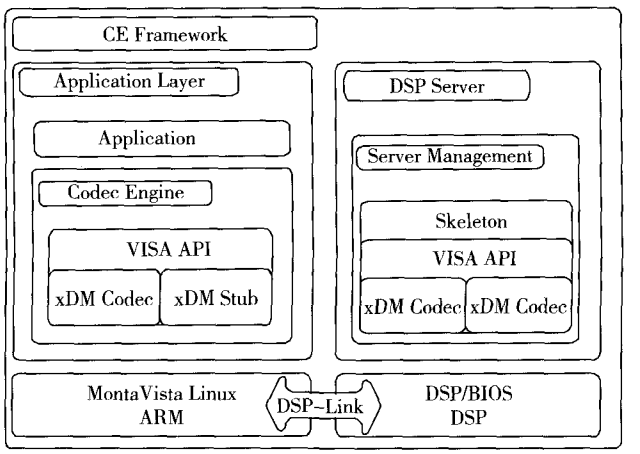


图 4　DM6446 基本框架　　Fig. 4　DM6446 framework

行，也可于 DSP 端远程调用. 应用程序调用本地算法包只需通过 codec engine 直接访问,而远程调用则需通过 VISA API 中 xDM Stub 和 Skeleton 配合完成.

基于类 Haar 特征的人眼检测系统由 3 部分构成. 其中，视频处理子系统通过摄像头采集人脸图像数据；人眼检测算法在图像中搜索并定位眼睛；输出模块将应用程序界面以及检测结果输出到显示器上. 考虑到视频的采集和结果的显示与应用程序结合紧密，故直接在应用程序代码中实现，并在 ARM 端运行. 而采用 AdaBoost 级联分类器的人眼检测算法由于运算量较大，故封装为 codec 置于 DSP 端运行，并由应用程序远程调用. 此配置符合 DM6446 平台的设计理念.

为适应 DM6446 芯片的运行特点，需对算法进行优化调整. 优化内容包括：① 调整代码以适应 DSP 平台特点，提升其在芯片上的运行速度. 本文使用 TI C62x/C64x FastRTS library 对算法代码进行优化，并尽量采用驱动表代替判别语句以减少流水线的中断. 实验结果表明，优化后的代码无论是在时钟周期上，还是在运行时间上都有很大改善. ② 基于类 Haar 特征的 AdaBoost 级联分类器各级特征值及阈值都使用浮点数表示，而 C64x+ 是定点的 DSP 核，因此需将检测算法代码作定点化. 定点化的关键步骤在于定标的确定. 本文遵循两个定标原则：定点化后的运算必须达到所要求的精度，及定点化后数据的运算结果不可超出变量的最大表示范围. 通过观察程序的运行，确定当定标 $Q = 24$ 时可满足以上要求，且检测效果最好. ③ 对检测算法参数优化以进一步提升在芯片上的运行效率. 基于类 Haar 特征的人眼检测算法有 3 个关键参数：图像预处理尺度参数、初始截取图块大小及截取图块放大参数. 通过比较算法在 3 个参数取不同值时的检测结果以及相应的检测时间可知，当取图像预处理尺度参数为 6.4，初始截取图块大小为 24×24 像素，以及截取图块放大参数为 1.1 时，算法能在检测结果与运算时间上获得最好平衡.

本文采用 Spectrum digital DM6446 DVEVM 开发板作为系统的具体实现平台. 开发板使用 NTSC 制式的摄像头作为图像采集输入设备，NTSC 制式的复合 AV 端子作为输出信号源，并通过 AV-VGA 转接器连接到电脑显示器上. DVEVM 开发板具有 256 MB 内存空间. 通过修改配置文件及程序启动参数，可分配其中 120 MB 作为 Linux 系统的内存空间，8 MB 作为 ARM 和 DSP 的共享内存，106 MB 为 DSP heap 动态分配内存，20 MB 为 DSP 端代码、堆栈及静态数据的存放空间，1 MB 为 DSP-Link 使用空间. 若芯片上还有其他应用需要运行，程序占用的空间可相应减小.

3 实验结果

在第一个实验中，我们使用卡耐基梅隆大学的 CMU-PIE 人脸图像数据库[8]中的静态图片代替摄像头的输入图像. PIE 数据库中包含 68 人约40 000张照片，每个人的照片涵盖了不同的光照条件、表情和姿态等可能影响检测结果的因素. 将数据库导入开发板，并使用人眼检测系统对数据库中的图片进行检测，记录系统在不同分辨率下的检测率、检测时间以及运行时 ARM 端和 DSP 端分别的负载率作为程序的运行结果. 实验结果如表 1.

表 1 系统在 CMU-PIE 数据库上的运行结果

Table 1 Detection results on CMU-PIE database

分辨率/像素	检测率/%	检测时间/s	ARM 负载率/%	DSP 负载率/%
320×240	95.53	0.13	11	24
720×480	96.71	0.19	13	28

由表 1 可知，无论是在 320×240，还是在 720×480 的分辨率上，基于 DM6446 的人眼检测系统都有很高的检测率，它都能有效区分人眼与非人眼物体. 在两种制式上，系统都可在 0.2 s 内完成两只眼睛的定位，做到完全实时检测. 同时，无论在 ARM 端还是 DSP 端，系统运行的负载率都维持在较低水平，使剩余的芯片资源可分配给其他功能使用，方便人眼检测系统的进一步扩展.

在第二个实验中，我们将实现的人眼检测 codec 内嵌于人脸识别系统中[9]，测试其对人脸识别精度的提升作用. 在人脸识别系统中，常会出现因误判人脸范围及人脸图像存在偏差角度使识别率下降. 而根据双眼的相对位置就可计算出人脸的偏差角度，从而对图像进行修正. 根据修正后图像中双眼的距离，依照人脸的一般比例结构，可进一步推算出人脸的准确范围，避免面部区域的误判. 因此通过检测定位双眼，修正脸部图像的范围及偏差角

度，可降低人脸识别算法的复杂度，提升识别率.

在本实验中，人眼检测系统中实现的基于类 Haar 小波的人眼识别算法包挂载于 DSP 端，供基于 Gabor 小波的人脸识别系统[10]调用，对输入图像作预处理修正. 人脸识别系统及眼睛检测算法包都运行于 DM6446平台上. 实验使用欧洲 BANCA 项目中的人脸数据库作为输入图像源. 通过将未经修正的人脸识别系统和经过修正的系统在 BANCA 数据库上分别进行识别，取两次识别的识别率、误识率及识别时间作为算法运行结果进行对比，结果如表2.

表 2　人脸识别系统在 BANCA 数据库上运行结果

Table 2　Face recognition results on BANCA database

算　法	识别率/%	误识率/%	识别时间/s
未经眼睛修正	89.72	8.52	2.39
经眼睛修正	93.22	5.31	2.55

由表 2 可知，经过人眼检测修正的人脸识别算法识别率有了较大提升，而误识率也有一定下降. 同时，人眼检测预处理带来的识别时间增长代价相对较小，可忽略不计. 因此，完成的基于类 Haar 特征的人眼识别算法包可有效应用于其他系统.

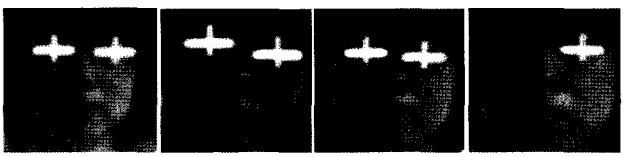
在第三个实验中，我们用摄像头实时采集的图像作为实际运行的人眼检测系统的输入源，以评估系统的真实性能. 考虑到系统在 DM6446 平台上的运行效率，摄像头输入的人脸图像大小被固定为 100 × 100 像素. 另外，为验证实际运行系统的检测鲁棒性，除一般的正面人脸情况外，还添加了一些常见的检测干扰，包括带角度偏差的情况、戴眼镜的情况以及遮挡其中一只眼睛的情况. 实验中对每种情况的输入都运行 5 次系统，每次取 30 帧图像进行检测，采用每种情况下的平均检测率和平均误检律作为实验结果，如表 3.

表 3　实际运行系统检测结果

Table 3　Detection results on actual running system

检测干扰类型	检测率/%	误检率/%
无	98.12	0.15
带角度偏差	92.15	1.26
戴眼镜	95.33	0.71
遮挡一只眼睛	87.92	3.41

通过观察实际运行系统在摄像头采集图像上的检测结果可见，尽管输入图像的尺寸控制在很小的范围内，系统仍能有效检测实时影像中的人眼. 即使在有戴眼镜、带角度偏差等影响检测效果的情况下，依然能有效进行眼睛检测定位，并获得较高的检测率. 图 5 显示了人眼检测系统在使用摄像头视频图像作为输入源时的实际运行结果. 由图可见，当出现一只眼睛被遮挡的情况时，系统能正确定位另一只眼睛，而被遮挡的眼睛则不会被检测出来. 可见基于 DM6446 平台的实时人眼检测系统已具有实用价值.



(a) 一般检测　(b) 带角度偏差　(c) 戴眼镜　(d) 遮挡一只眼睛

图 5　人眼检测系统运行效果

Fig. 5　Human eyes detection system

结　语

本文介绍了一种基于类 Haar 特征的人眼检测算法，并在 TI TMS320DM6446 平台上进行实现. 通过实验发现，该检测系统可在占用较少芯片资源的情况下有效进行眼睛检测定位. 将人眼检测算法包应用于人脸识别系统时，可有效提升识别算法的正确率，降低误识率.

参考文献：

[1] 董文会，曲培树，吴晓娟，等. 复杂背景下多姿态人脸图像中的人眼检测 [J]. 山东大学学报工学版，2006，36(3)：18-25.

[2] 侯贵龙，张高伟. 集成人眼检测安全预防的行驶记录仪系统设计 [J]. 电子技术，2008，6：40-42.

[3] LIN Dao-tong，YANG Chen-ming. 基于脸圆拟合和黑像素滤波的实时眼睛检测 [C] //2004 IEEE 多媒体与展览国际会议论文集. 台北：IEEE 出版社，2004，2：1167-1170（英文版）.

[4] LU Hu-chuan，ZHANG Wei，YANG De-li. 基于矩形特征和像素模式细节的眼睛检测 [C] //2007 智能信号处理与通信国际研讨会论文集. 厦门：IEEE 出版社，2007：746-749（英文版）.

[5] ZHANG Guang-yuan，CHEN Bo，FENG Rui-jia，等. 基于使用胡氏不变矩支持向量机的实时司机眼睛检测 [C] //第 7 届机器学习与神经机械学国际会议论文集. 厦门：IEEE 出版社，2008：2999-3004（英文版）.

[6] Viola P，Jones M. 强健的实时物体检测 [C] //2001 IEEE 统计与计算机视觉理论研讨会论文集. 温哥华：IEEE 出版社，2001：137-154（英文版）.

[7] Lienhart R，Maydt J. 用于快速物体检测的扩展 Haar 特征集 [C] //2002 图像处理会议论文集. 纽约：IEEE

出版社，2002：900-903（英文版）.
[8] Sim T, Baker S, Bsat M. 卡内基-梅隆大学姿势、光照与表情数据库［J］. IEEE 模式分析与机器学习通讯，2003，25(12)：1615-1618（英文版）.
[9] 沈琳琳，明 仲. 基于皮肤模板和改进 HMM 的自动人脸识别系统［J］. 深圳大学学报理工版，2008，25(1)：71-75（英文版）.
[10] SHEN Lin-lin, BAI Li. 使用互提升学习选择人脸识别 Gabor 特征［J］. 模式识别通讯，2006，27(15)：1758-1767（英文版）.

Abstract: 1000-2618(2009)04-0424-EA

【Optoelectronics and Communication Engineering】

Real time eye detection system based on DM6446

LI Yu-wen[1], ZHOU Jia-rui[2], and SHEN Lin-lin[2]

1) Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518029 P. R. China

2) College of Computer and Software Engineering Shenzhen University Shenzhen 518060 P. R. China

Abstract: A Haar-like features based eye detection algorithm was introduced in this paper. With its fast searching speed and high detection rate, the algorithm fits to be implemented on portable platform. TI TMS320DM6446 is a high performance digital multimedia processing chip provided by Texas Instruments Corporation. With the eye detection algorithm packed into codec, an optimized real time eye detection system was implemented on DM6446 platform. The detection algorithm codec was loaded into the DSP-side for remote call. Application on the ARM-side captured face images from camera and output detection results to computer monitor. The implemented eye detection codec was also employed in a face recognition system. Experimental results demonstrate that the real time eye detection system on DM6446 can search and locate eyes effectively with limited chip resources occupied.

Key words: Haar-like feature; eye detection system; DM6446; face recognition system

References:

[1] DONG Wen-hui, QU Pei-shu, WU Xiao-juan, et al. Eye detection for multi-pose face image in complex background [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2006, 36(3): 18-25 (in Chinese).
[2] HOU Gui-long, ZHANG Gao-wei. The design of vehicle data recorder integration with eyes detection [J]. Electronic Technology, 2008, 6: 40-42 (in Chinese).
[3] LIN Dao-tong, YANG Chen-ming. Real-time eye detection using face circle fitting and dark-pixel filtering [C] // 2004 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Taipei: IEEE Press, 2004: 1167-1170.
[4] LU Hu-chuan, ZHANG Wei, YANG De-li. Eye detection based on rectangle features and pixel-pattern-based texture features [C] // 2007 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Xiamen: IEEE Press, 2007: 746-749.
[5] ZHANG Guang-yuan, CHEN Bo, FENG Rui-jia, et al. Real-time driver eye detection method using support vector machine with Hu invariant moments [C] //The 7th International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Xiamen: IEEE Press, 2008: 2999-3004.
[6] Viola P, Jones M. Robust real-time object detection [C] //2001 IEEE Workshop on Statistical and Computational Theories of Vision. Vancouver: IEEE Press, 2001: 137-154.
[7] Lienhart R, Maydt J. An extended set of haar-like features for rapid object detection [C] //2002 International Conference on Image Processing. NY: IEEE Press, 2002: 900-903.
[8] Sim T, Baker S, Bsat M. The CMU pose, illumination, and expression database [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(12): 1615-1618..
[9] SHEN Lin-lin, MING Zhong. Automatic face recognition based on skin masking and improved HMM [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2008, 25(1): 71-75.
[10] SHEN Lin-lin, BAI Li. MutualBoost learning for selecting Gabor features for face recognition [J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(15): 1758-1767.

【中文责编：英 子；英文责编：雨 辰】