

基于连续型 Adaboost 算法和 Cascade 结构的红外人脸检测

严 超, 王元庆

(南京大学电子科学与工程系, 江苏 南京 210093)

摘 要:自由立体显示技术中,人脸位置的探测与跟踪是关键之一。由于光照变化等因素的影响,对多人的脸部位置的探测很难达到快速、准确的目的。提出一种基于连续型 Adaboost 算法和 Cascade 结构的新方法。该方法采用红外主动照明模式,通过隔离可见光照,基本消除了光照变化对人脸检测造成的影响。新检测算法中 Adaboost 检测速度很快, Cascade 结构可以检测那些难以识别的人脸,大大地提高了人脸检测的速度和鲁棒性。对视频流图像进行的检测实验中,没有出现人脸“漏检”,极少出现非人脸的“误检”。检测速度在 Windows XP, Pentium IV, 图片分辨率为 640×480 的条件下,可达 25 f/s,完全达到了实时性的要求。另外,实验证明该方法对于人脸表情变化和人脸小角度倾斜也具有鲁棒性。

关键词:连续 Adaboost 算法; Haar 特征; 积分图; Cascade 结构; 红外主动照明模式

中图分类号: TP301.6 **文献标识码:** A

Infrared face detection based on real Adaboost algorithm and Cascade structure

YAN Chao, WANG Yuan-qing

(Stereo Imaging Laboratory of Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Location and tracking the human faces is one of the critical technologies in free stereoscopic display system. But because of illumination variation and some other reasons, it is difficult to detect human faces accurately and fast. In this paper, an infrared face detection based on real Adaboost algorithm and Cascade structure is implemented. With active infrared illumination and separating of visible light, the problem caused by variation of illumination is almost solved. Meanwhile, the combination of real Adaboost and Cascade structure pays more attention to the human faces which is more difficult to identify, making the detection more robust and quicker a lot. In the detection of video sequence, all human faces can be detected, and misdetection rarely appears. The average processing time on a windows XP, PIV 2.4 GHz PC is about 40 ms for a 640×480 -pixel image. So the improved detection is real-time. In addition, experiment proves that the improved detection is robust when there is variation of facial expression or a little degree leaning of human face.

Key words: real Adaboost algorithm; Haar feature; integral image; Cascade structure; active infrared illumination

1 引 言

人脸检测是指在输入图像中确定所有人脸(如果存在)的位置、尺度和位姿的过程^[1]。人脸检测技术应用广泛,可用于公安系统的罪犯身份识别、安全验证系统、信用卡验证、医学、档案管理、视频会议、人机交互系统、执照及护照与实际持证人的核

对、银行和海关的监控系统及自动门卫系统等。评价人脸检测算法好坏的标准有两条:准确性和速度。

基金项目:国家自然科学基金重点项目资助(No. 608320036)资助。

作者简介:严 超(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为立体显示技术,立体视觉信息处理。

收稿日期:2009-06-12; **修订日期:**2009-07-09

准确性方面,人脸检测是一个复杂而精细的过程,个体的外貌差异、表情变化以及图像采集时光照条件的不同,都会对最终的人脸检测结果造成影响。而在速度方面,越来越多的应用场合要求人脸检测算法要有较快的速度,能够满足实时性的要求。

人脸检测作为模式识别领域的热点问题,近几年出现了一大批分析角度不同,处理方法各异优秀算法。比如:主分量分析(principal component analysis, PCA)^[2]、贝叶斯决策(Bayes decision rule)^[3]、支持向量机(support vector machine, SVMs)^[4]、人工神经网络模型(artificial neural network, ANN)^[5]。基于这些算法所训练出的人脸检测系统在准确性和检测速度方面均达到了一定水准。

Viola 等人于 2001 年提出了一种基于 Haar 型特征,利用积分图进行运算的离散型 Adaboost 算法,并将其与 Cascade 结构结合,学习出基于离散型 Adaboost 算法的瀑布型人脸检测器。后来 Schapire 等人对离散型 Adaboost 算法进行改进,使得弱分类器的输出具有了连续的置信度,也使得算法的收敛速度得以加快,并在此基础上学习出了基于连续型 Adaboost 算法的瀑布型人脸检测器。这种基于连续型 Adaboost 算法和 Cascade 结构的人脸检测器是目前检测正确率最高的人脸检测系统之一,同时其检测速度也远远快于几乎所有基于其他算法的人脸检测器。

虽然基于连续型 Adaboost 算法和 Cascade 结构的人脸检测器具有上述优点,但采集图像时光照条件的不同仍对其检测结果造成了影响。为了解决这一问题,本文引入了红外主动照明模式,使得所有的被采集图像都是在相同的光照条件下取得。同时,红外照明下的所得图像由于其自身的一些特点,对于人脸定位及后续可能进行的人眼定位工作提供了极大便利。

本文的贡献在于:①引入了红外主动照明模式,使所有的图像采集工作在相同的光照条件下完成,消除了光照条件不同对人脸检测结果的影响。②连续型 Adaboost 算法使得人脸检测的输出具有连续的置信度,能够更加精确地描述分类边界,从而提高了人脸检测的精确度。③利用 Cascade 结构优化检测速度原本已经很快的连续型 Adaboost 算法,形成基于连续型 Adaboost 算法的瀑布型人脸检测器。优先检测易于辨识的对象,将检测重点“聚焦”于难以辨识的对象,进一步提高了人脸检测的速度。

2 连续型 Adaboost 算法

如果一种分类算法其正确率刚刚超过 50%,即略好于随机猜测,我们称其为弱分类算法,对应的分类器为弱分类器;相应的,如果一种分类算法其正确率远远高于 50%,我们称其为强分类算法,对应的分类器为强分类器。Boosting 算法的中心思想就是通过整合和训练,将弱分类器提升为强分类器。Adaboost 算法是 Boosting 算法的一种,是能够“自适应”的 Boosting 算法。Adaboost 算法能够自适应地调节训练样本权重的分布,不断挑选出当前样本权重分布下表现最佳的弱分类器,并整合所有得到的弱分类器,让它们按照一定的权重投票,组成一个强分类器。

2.1 Haar 特征和积分图

Adaboost 算法是基于特征的算法,因为在给定有限数据的情况下,基于特征的检测能够编码特定区域的状态,而且基于特征的系统比基于像素的系统要快得多^[6]。Adaboost 算法使用的特征是 Haar 特征^[7]。Haar 型特征是 Paul Viola 等提出的一种简单矩形特征,有五种基本的特征模板,如图 1 所示。Haar 特征的特征值定义为白色(黑色)矩形像素和减去黑色(白色)矩形像素和。

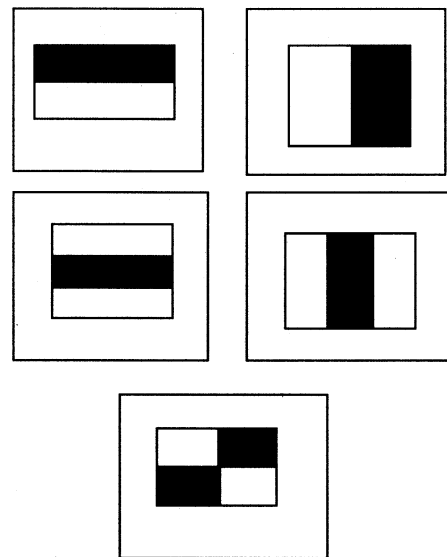


图 1 Haar 特征

这 5 种基本类型的 Haar 特征模板可以在检测子窗口中的“任意”位置,以“任意”尺寸摆放,每一种摆放形态都称为一种特征^[6]。由此可见,同一个检测子窗口中会有许许多多的特征,如一个 24 × 24 的窗口中,Haar 特征的数目超过了 160000。如果对它们的特征值直接进行计算,其时间消耗量无疑是相当可观的。因此,对 Haar 特征值的计算应当使用

积分图。对于积分图,其中任意一点的值是该点左上方所有像素的灰度值之和。如对于图像中的一点 $A(x,y)$,其在积分图中的值 $I(x,y)$ 为:

$$I(x,y) = \sum_{\substack{x' \leq x \\ y' \leq y}} i(x',y')$$

其中, $i(x',y')$ 为点 (x',y') 处的灰度值。另外,定义 $b(x,y)$ 为点 (x,y) 及其 y 方向向上所有像素的灰度值之和,即:

$$b(x,y) = \sum_{y' \leq y} i(x,y')$$

并定义 $b(x,0) = 0, I(0,y) = 0$ 。由上述可知 $I(x,y)$ 可以通过下式迭代求出:

$$I(x,y) = I(x-1,y) + b(x,y)$$

$$b(x,y) = b(x,y-1) + i(x,y)$$

积分图的引入大大简化了特征值的计算过程。如图2所示,区域 A 的灰度和仅由 1,2,3,4 四点的特征值即可得出。

$$I_A = I_1 + I_4 - I_2 - I_3$$

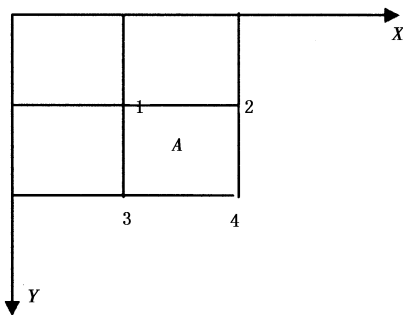


图2 积分图

由此可见,利用积分图,Haar 矩形特征的特征值计算只与此特征矩形端点的特征值有关,而与图像坐标值无关。因此,不管此矩形特征的尺度如何,特征值的计算所耗费的时间都是常量,而且都只是简单的加减运算。正因如此,积分图的引入,大大地提高了人脸检测的速度^[6]。

2.2 连续型 Adaboost 算法介绍

(1) 给定训练样本集合 $S = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$, 弱分类器空间 H , 其中, $x \in X$ 为样本向量, $y = \pm 1$ 为类别标签, n 为样本总数。初始化样本概率分布 $D_i(i) = 1/n, i = 1, 2, \dots, n$ 。

(2) For $t = 1, 2, \dots, T$ (T 为需要得到的特征数目):

①对 H 中的每个弱分类器 h 做如下操作:

1) 对样本空间 X 进行划分,得到: x_1, x_2, \dots, x_m ;

2) 在训练样本的概率分布 D_t 下,计算:

$$W_k^i = P(x_i \in X_j, y_i = k) = \sum_{\substack{x_i \in x \\ y_i = k}} D_t(i), k = \pm 1$$

3) 设置弱分类器在这个划分上的输出:

$$\forall x \in X_j, h(x) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{W_{+1}^j + \varepsilon}{W_{-1}^j + \varepsilon} \right), j = 1, 2, \dots, m$$

其中, ε 为一小正常数;

4) 计算归一化因子:

$$Z = 2 \sum_j \sqrt{W_{+1}^j W_{-1}^j}$$

②在弱分类器空间中选择一个 h_t , 使得 Z 最小化:

$$Z_t = \min Z,$$

$$h \in H$$

$$h_t = \operatorname{argmin} Z,$$

$$h \in H$$

③更新训练样本概率分布:

$$D_{t+1}(i) = D_t(i) \frac{\exp[-y_i h_t(x_i)]}{Z_t \rho}$$

其中, Z_t 为归一化因子,使得 D_{t+1} 为一个概率分布。

(3) 最终强分类器 H 为:

$$H(x) = \operatorname{sign} \left[\sum_{t=1}^T h_t(x) - b \right]$$

其中, b 为手动设定的阈值,默认为 0。类似地可以定义 H 的致信度:

$$\operatorname{conf}_H(x) = \left| \sum_t h_t(x) - b \right|$$

2.3 连续型 Adaboost 算法论证

为了说明连续型 Adaboost 算法结构严谨、准确度高、可用度高的特点,这里针对算法流程中的几点进行论证。

首先,对 Z_t 作为归一化因子进行定量论证。

$$\begin{aligned} & \sum_i D_t(i) \exp[-y_i h_t(x_i)] \\ &= \sum_j \{ \sum_{y=1} D_t(i) \exp[-h_t(x_i)] + \sum_{y=-1} D_t(i) \exp[h_t(x_i)] \} \\ &= \sum_j \{ [\sum_{y=1} D_t(i)] \cdot \sqrt{\frac{W_{-1}^j}{W_{+1}^j}} + [\sum_{y=-1} D_t(i)] \cdot \sqrt{\frac{W_{+1}^j}{W_{-1}^j}} \} \\ &= \sum_j (W_{+1}^j \cdot \sqrt{\frac{W_{-1}^j}{W_{+1}^j}} + W_{-1}^j \cdot \sqrt{\frac{W_{+1}^j}{W_{-1}^j}}) \\ &= 2 \sum_j \sqrt{W_{+1}^j \cdot W_{-1}^j} = Z_t \end{aligned}$$

其次,对 Z 的最小化选取进行定性论证。

通过对归一化因子 Z 的计算式分析可以得到:在样本权重归一化的前提下,同一划分区域内正负样本的权重相差越大, Z 的取值越小,这时,正负样本也最容易区分,分类器的性能也越好;同理,同一划分区域内正负样本的权重相差越小, Z 的取值越大,分类器的性能也越差。所以,选取 Z 值最小的弱分类器为最佳弱分类器是完全正确的。

再次,对平滑因子 ε 的作用进行定性论证。

假设弱分类器 $h(x)$ 的表达式中不含有平滑因子 ε 。在一个弱分类器中,当某一划分区域内正负样本比重相差悬殊时,落在该区域内的样本的输出值将是绝对值意义上的大数。如果这个弱分类器是组成强分类器的一员,则由强分类器 $H(x)$ 的表达式可知,很可能会因为这个弱分类器的输出值过大而造成对该种特征的过学习。平滑因子的加入则可以有效地避免弱分类器的输出值过大,从而也有效地避免过学习现象的产生。

同时,由算法流程可知,Adaboost 算法的自适应性主要是通过其对样本权重的不断调整实现的。通过提高当前弱分类器分类错误的样本的权重,降低当前弱分类器分类正确的样本的权重,来突出分类错误的样本,使得以后训练得到的弱分类器更加针对对于这些样本。Freund 和 Schapire 证明了:随着弱分类器个数的增加,得到的强分类器在训练样本上的分类错误率按指数递减^[8]。

3 Cascade 结构

基于 Adaboost 算法的 Cascade 结构人脸检测器由 Paul Viola 和 Michael Jones 于 1998 年提出。其主要性能特点是通过强分类器的合理布局,在前面的层尽可能多的辨识出并拒绝非人脸,以大大提高人脸检测器的检测速度。Cascade 结构的人脸检测器的结构框架如图 3 所示,由若干个层次构成,每个层次都是由连续型 Adaboost 算法训练得到的强分类器。只是每个强分类器所包含的弱分类器个数不同,位于级联结构前端的强分类器包含的弱分类器的个数较少,越到后来,强分类器包含的弱分类器的个数越多。由该种分类器的结构可知:位于前端的强分类器所包含的 Haar 特征较少,分类速度很快,用来辨识出占大多数的易于辨识的非人脸并加以拒绝。位于后面几层的强分类器包含 Haar 型特征的数量增多,但是能够到达这些层的非人脸的数量已经很少,并且在实际检测时,待检图像中对应人脸的区域也非常少,所以后面几层的辨识也不耗时。在实际的实验过程中,基于连续型 Adaboost 算法和 Cascade 结构的人脸检测器完全能够满足实时性的要求。

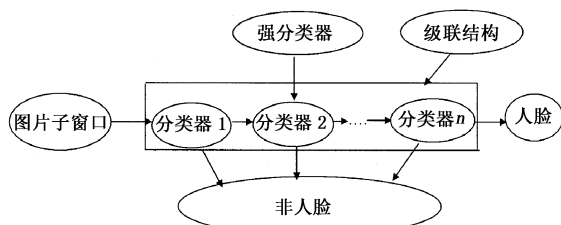


图3 Cascade 结构

4 红外主动照明模式

人脸检测是基于灰度分布的检测,因此光照条件在很大程度上影响着人脸检测的效果。而在人脸检测的实际应用过程中,光照条件往往又不是一成不变的。偏光、侧光导致的高光和过亮、过暗、阴影均会导致人脸检测率和识别率的大幅度下降。截至目前,光照变化仍是实用人脸识别系统的瓶颈之一^[9],所以有必要对光照进行补偿。针对光照补偿问题人们已经提出了多种解决方法。如:二维 Gabor 函数加强边缘轮廓^[10],人脸器官横纹特征^[11],SFS 方法^[12]。这些方法或针对特定图像,或计算过程复杂,在实际应用中都有各自的局限。

我们通过对红外光照条件的研究发现,在红外光照条件下,灰度的分布相对于可见光照条件更为均匀,因此红外光照条件的变化对人脸检测效果的影响也更小。而且本文提出的红外主动照明模式是基于硬件的光照补偿,使得所有的被采集图像都是在相同的光照条件下取得。因此在保证了良好光照补偿效果的同时也大大扩展了光照补偿方法的应用范围。

红外主动照明模式的硬件结构包括红外照明装置、摄像头、视频采集卡、视频传输线和 PC 处理机。红外照明装置负责提供稳定强度的红外光照明条件,摄像头捕捉到的待检测图像通过视频传输线输送到安装在 PC 机中的视频采集卡中,然后借助 PC 机中的各种相关程序对图像进行处理。

5 实验及总结

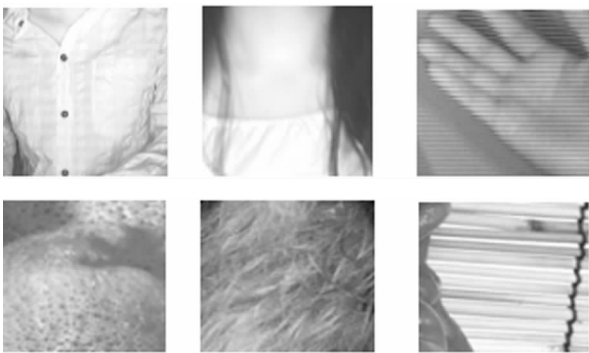
本文训练了一个 8 级的瀑布式人脸检测器,针对实际应用中非人脸样本远远多于人脸样本的状况,每级分类器中都将人脸样本与非人脸样本的比例定为 1:8。试验中,所用人脸样本数为 5009 个,非人脸样本数为 41700 个。另外,针对纹理越丰富的非人脸样本越容易被误检的状况,我们在尽量使非人脸样本离散化的同时,保证了一定比例的纹理丰富的非人脸样本。所用样本实例如图 4 所示。本文所得人脸误检率仅为 4%。实际视频流的检测如图 5 所示,没有出现“漏检”现象,极少出现“误检”现象。

本文将连续型 Adaboost 算法、Cascade 结构和红外主动照明模式结合在一起,应用于人脸检测。相对于二值断言的离散型 Adaboost 算法,连续型 Adaboost 算法在刻画不同样本的分类边界时能够提供连续的致信度,提高了人脸检测的准确性;Cascade 结构将检测工作“聚焦”于难以辨识的对象,进

一步提高了人脸检测的速度,克服了因检测速度慢而造成的“丢帧”现象;红外主动照明模式提供稳定强度的红外光照明条件,基本消除了光照变化对人脸检测造成的影响。经实验验证,该方法准确率高,实时性好,对光照变化、人脸小角度倾斜和表情变化鲁棒性好,具有良好的应用前景。



人脸样本举例(包括正面,左右小角度倾斜,佩戴眼镜,带有表情等不同情况)



非人脸样本

图4 实验样本举例



图5 实际视频流中的人脸检测
(图中黑色方框为检测到的人脸区域)

参考文献:

- [1] 梁路宏,艾海舟,等.人脸检测研究综述[J].计算机学报,2002,(5):449-458.
- [2] B Moghaddam, A Pentlan. Beyond linear eigenspaces: Bayesian matching for face recognition[C]//Faces Recognition: From Theory to Application, New York; Springer Verlag, 1998:230-243.
- [3] H Schneiderman, T Kanade. A statistical method for 3D object detection applied to faces and cars[C]. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, Hilton Head Island. South Carolina. ,2000.
- [4] V P Kumar, T Poggio. Learning based approach to real time tracking and analysis of faces[EB/OL]. http:cbcl.mit.Edu/cbcl/publications/ai·publications,1999.
- [5] H A Rowley. Neural network-based human face detect[D]. Ph. D. dissertation. Pittsburgh, USA; Carnegie Mellon University, 1999.
- [6] 赵楠.基于Adaboost算法的人脸检测[D].北京:北京大学,2005.
- [7] Paul Viola, Michael Jones. Rapid object detection using a boosted Cascade of simple features[C]//Proceeding of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Kauai Hawaii, USA, 2001:905-910.
- [8] Freund Yoav, Schapire R E. Experiments with a new boosting algorithm machine learning[C]. Proceedingsting of the Thirteenth International Conference, 1999:148-156.
- [9] 郑庆,等.基于复合变换的人脸光照补偿方案[J].计算机应用研究,2008,25(2):507-508.
- [10] Fridich J, Goljan M, Du R. Detection LSB steganography in color and gray-scale images[J]. Magazine of IEEE Multimedia: Special Issue on Security, 2001, 8(4): 22-28.
- [11] Fridich J, Goljan M, Hoge D. Steganalysis of JPEG images; breaking the F5 algorithm[C]//Proc of the international Workshop on Information Hiding, Lecture Notes in Computer Science 2578. [S. l.]; Springer-Verlag, 2002: 310-323.
- [12] Tsengyc, Chenyy, Panhk. A secure data hiding scheme for binmy images[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(8):1227-1231.