快速人脸检测技术综述

李月敏[1]　陈杰[2]　高文[1,2,3]　尹宝才[1]
[1](北京工业大学计算机学院多媒体与智能软件技术实验室　北京　100022)
[2](哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院　哈尔滨　150001)
[3](中国科学院计算技术研究所先进人机通信技术联合实验室　北京　100080)

摘　要　人脸检测问题研究具有很重要的意义，可以应用到人脸识别、新一代的人机界面、安全访问和视觉监控以及基于内容的检索等领域，近年来受到研究者的普遍重视。人脸检测要走向实际应用，精度和速度是亟需解决的两个关键问题。经过 20 世纪 90 年代以来十多年的发展，人脸检测的精度得到了大幅度的提高，但是速度却一直是阻挠人脸检测走向实用的绊脚石。为此研究者们也作了艰辛的努力。直到 21 世纪 Viola 基于 AdaBoost 算法的人脸检测器的发表，人脸检测的速度才得到了实质性的提高。该算法的发表也促进了人脸检测研究的进一步蓬勃发展，在这方面先后涌现出了一批优秀的文献。基于此，本文在系统地整理分析了人脸检测领域内的相关文献之后，从速度的角度将人脸检测的各种算法大致划分为初始期，发展期，转折点和综合期等四类，并在此基础上进行了全新的总结和论述，最后给出了人脸检测研究的一些可能的发展方向。

关键词　人脸检测，速度，人脸识别，模式识别，Boosting
图法分类号:TP391.4

Face Detection: a Survey

Yuemin Li[1]　Jie Chen[2]　Wen Gao[1,2,3]　Baocai Yin[1]
[1](Multimedia and Intelligent Software Technology Laboratory
Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)
[2](School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of
Technology, Harbin, 150001, China)
[3] (Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences,
Beijing, 100080, China)
ymli@jdl.ac.cn, chenjie@jdl.ac.cn,
wgao@jdl.ac.cn, ybc@bjut.edu.cn

Abstract: Face detection is born, as an independent subject, of face recognition and develops with the requirement of the automatic face recognition system. Over the past ten years face detection has been thoroughly studied in computer vision research for its interesting applications, such as a face recognition system, a surveillance system and a machine interface. Whether face detection can come into use depends on the two key problems: the detection rate and the velocity together. Although the detection rate has been improving during the last ten years, the speed is still a problem to cumber face detection system from being widely used. The hard work of researchers, especially the release of the AdaBoost based classifier presented by Viola, has made the detection velocity improve rapidly. Since, the researches began to lay more emphasis on the velocity of the system and a lot of algorithms, about how to increase the speed of face detection, have been

presented. Based on these rapid developments of its velocity, this paper demonstrates it from the view of velocity. The whole stage of face detection is divided into four parts according to the extent of the face-detection velocity: the initial phase, the developing phase, the turning point and the synthesis phase. After the systematical analyses of the papers in different phases, several promising directions for future researches are also proposed in this paper.

Key words: Face detection, velocity, face recognition, pattern recognition, Boosting

1 引言

迄今为止，机器视觉技术的发展已经历了一个较为漫长的旅程。它最初只是应用于生产流水线，简单的模拟人的视觉来执行一些繁琐、重复性的任务。经过研究者们的不懈努力，今天我们已经可以利用它实现更有效、友好、自由的人机交互界面，并且随着人脸研究的进一步发展，更可以让计算机实现通过观察一个人以及这个人的表情变化等做出相应的反映。近几年电子商务的蓬勃发展对安全性提出更高要求，这也推进了人脸研究的发展和应用，最终将促使人类进入了一个全新的人机世界[1,2]。

人脸研究，主要包括人脸识别技术(face recognition)和人脸检测(face detection)技术的研究。最初人脸研究主要集中在人脸识别领域，而且早期的人脸识别算法都是在认为已经得到了一个正面人脸或者人脸很容易获得的前提下进行的[3]。但是随着人脸应用范围的不断扩大和开发实际系统需求的不断提高，这种假设下的研究不再能满足需求[4, 5]。人脸检测开始作为独立的研究内容发展起来。目前，国内外的文献中所涉及的人脸检测算法已经有很多种，许多重要的国际会议和期刊都也都涉及到人脸检测问题研究论题。人脸检测开始广泛应用到全新人机界面、基于内容的检索、数字视频处理、视觉监测等许多领域。

人脸检测（face detection）是指对于任意一幅给定的图像，采用一定的策略对其进行搜索以确定其中是否含有人脸，如果是则返回人脸的位置、大小和姿态 [6] 。它是一个复杂的具有挑战性的模式检测问题，其主要的难点有两方面，一方面是由于人脸内在的变化所引起：(1) 人脸具有相当复杂的细节变化，不同的外貌如脸形、肤色等，不同的表情如眼、嘴的开与闭等；(2) 人脸的遮挡，如眼镜、头发和头部饰物以及其他外部物体等；另一方面由于外在条件变化所引起：(1) 由于成像角度的不同造成人脸的多姿态，如平面内旋转、深度旋转以及上下旋转，其中深度旋转影响较大；(2) 光照的影响，如图像中的亮度、对比度的变化和阴影等。(3) 图像的成像条件，如摄像设备的焦距、成像距离，图像获得的途径等等。这些困难都为解决人脸检测问题造成了难度。如果能够找到一些相关的算法并能在应用过程中达到实时，将为成功构造出具有实际应用价值的人脸检测与跟踪系统提供保证。

有关人脸检测的较为详尽的综述见[6,7,8]，它们着重于介绍各种方法所使用的特征和模型。本文则在系统地整理分析了相关的研究文献后从另外一个角度——人脸检测速度——对近年来的研究进行综述。这一思想的提出主要是基于如果人脸检测要走向实用，就必须实现实时检测的要求。因此，速度应该是每个实用系统都必须考虑的一个关键问题。本文将人脸检测领域的相关文献按其速度大致划分为四类：初始期，发展期，转折点和综合期进行阐述。

需要说明的是，我们这里的分类更多的是侧重人脸检测速度的研究，其分类中的各类在时间上不一定严格排列，可能会有一定的交叉。例如目前还有一些研究者侧重于提高检测的精度 [9]。但总的趋势是在检测精度提高的同时，速度越来越受到研究者们的青睐[10,11]。

2 初始期

这一阶段内的研究更多的是以检测精度的提高和各种视角的人脸检测为主要内容，速度问题的考虑相对较少。一些代表性的学者和他们的研究有：

MIT 的 Sung 等提出的基于样本学习的方法见[12]。他们采用 k-均值聚类方法在特征空间中建立 6 个“人脸”簇(Clusters)和包围“人脸”簇的 6 个“非人脸”簇，以使“人脸”与“非人脸”模式的边界更为清晰，如图 1 所示。算法利用训练样本到各个簇中心的距离训练一个多层感知器进行分类，用来实现检测人脸。值得强调的是为了解决人脸检测中“非人脸”样本的选取问题，Sung 等使用了“自举”(bootstrap)方法：首先建立一个仅使用“人脸”样本和少量“非人脸”样本训练的初始分类器对一组图像进行检测，将所有的错误报警(不是人脸而被错检为“人脸”的结果)加入“非人脸”样本库；然后使用得到的“人脸”和“非人脸”样本训练构造新的分类器重新进行检测。以上过程不断迭代，直到收集了足够的“非人脸”样本。这种非人脸的收集方法后来被许多研究者使用[10,11,13]。

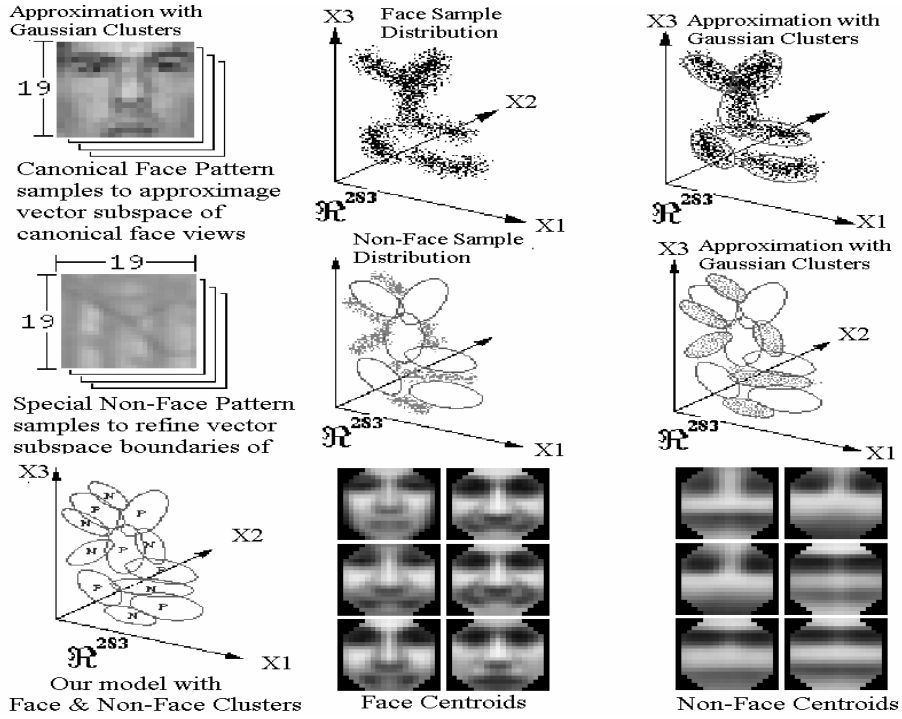


Fig. 1. Face and nonface clusters used by Sung and Poggio [12]. Bottom row are the final models which consist of six Gaussian “face” clusters and six “nonface” clusters [12](Courtesy of Tomao Poggio).

图 1. Sung 和 Poggio 文章中的“人脸”和“非人脸”簇。最下面一行是最后的模型，包括六个“人脸”的高斯模型和六个“非人脸”的高斯模型。

M. H. Yang 提出了一种基于 SNoW (Sparse Network of Winnows) 的学习体系，用于检测具有不同特征、表情、姿态和光照条件下的人脸 [13]。SNoW 是一种具有线性函数性质[14, 15]、采用 Winnow 算法[16]进行权值更新的稀疏神经元网络。在学习域内，它对所有可能的、未知先验概率的、数量巨大的特征（共采用了 102,400 种可能的特征）进行裁减。他们用于训练的人脸图像库主要来自 Olivetti, UMIST, Harvard, Yale 以及 FERET 等。他们还将结果同采用神经元网络[17], Kullback 相关信息[18], 朴素的 Bayes 分类器[19]和 SVM[20]的结果

进行了比较，表明效果很好。

H. Schneiderman 等 [1,19] 提出了一种基于后验概率估计的方法来对三维的物体进行检测。该方法利用贝叶斯原理将后验概率转化为一个计算类条件概率密度的问题，将难以估计的先验概率用一个比率参数代替，作为调节检测器敏感度的参量。他们先对样本进行小波变换，提取出 17 个特征，再对这 17 个特征分别进行统计，通过统计计算训练样本的直方图求得人脸和非人脸两种模式的概率分布。然后用估计到的概率来检测正面人脸和侧面人脸。检测的相关结果可以参见表 2。

3. 发展期

所有划分为发展期的研究都对人脸检测中的速度问题进行了较多的考虑，使系统向实际应用要求的速度逐步靠拢。这个时期中的人脸检测算法从对系统加速的不同角度方面来看，可以分为以下几类：

3.1 选择计算量小的特征

由于肤色和边缘特征计算量相对较少，因此它们经常用于提高检测速度，或者直接使用或者是作为系统的预处理部分。只使用单一的肤色或者边缘特征，一般情况下误检率比较高，检测精度也有限。因此它们更多是用在一个检测系统的初始阶段，对图像中的人脸位置进行初定位，然后再用其它的特征进行判断，去除初检结果中的假脸，这样可以既提高检测的速度又保证了检测的精度。

3.1.1. 基于肤色特征

对于肤色检测问题的研究有很多，它们为人脸检测中使用肤色特征打下了基础。如 Michael J. Jones 等人基于大量的样本图像对肤色检测问题进行了统计分析，比较了用直方图模型和混合高斯模型进行肤色检测的情况[21]；B. Martinkauppi 对 Skin locus 的理论和方法在不同光照条件下的肤色分布问题作了细致的分析 [22] ，他指出在特定的摄像机条件下，各种光照条件下的肤色分布可以用两个二次或者多次的多项式来完全描述，这为解决肤色检测的光照问题提供了一些依据。

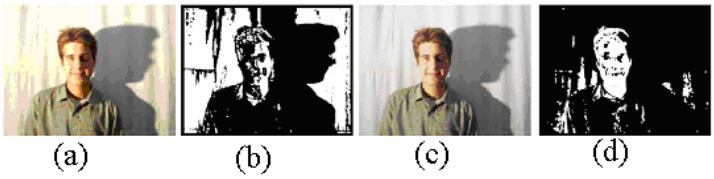


Fig. 2. Skin detection: (a) a yellow-based face image; (b) skin regions of (a) shown in white; (c) a lighting compensated image of (a); (d). Skin regions of (c) [27](Courtesy of R. L. Hsu)

图 2. 肤色检测：(a)黄色光照条件下的人脸图像； (b) 从图(a)中检测到的肤色区域（白色部分）；(c)光照补偿后的图像；(d) 从图(c)中检测到的肤色区域.。

肤色用于人脸检测时，可以采用不同的建模方法，主要有高斯模型、高斯混合模型以及非参数估计等。在[23]中，作者分别使用了高斯模型和混合高斯模型在不同颜色空间中建立肤色模型来进行人脸检测，并将其结果进行了对比。在[24]中，文章基于 skin locus 建立肤色模型，提取彩色图像中的人脸面部区域实现人脸检测。该方法能够处理多种光照的情况，但是算法需要在固定摄像机参数前提下才有效。在 Dorin Comaniciu 的文章中[25, 26]，他使用非参数的核函数概率密度估计法来建立肤色模型，并使用 mean shift 方法进行局部搜索实

现了人脸的检测和跟踪。该算法提高了人脸的检测速度，对于遮挡和光照也有一定的鲁棒性。但是这种方法和其他方法的可结合性不是很高，用于人脸检测时，处理复杂背景和多个人脸时存在困难。为了解决光照问题，R. L. Hsu 提出了针对不同光照进行补偿，然后再检测图像中的肤色区域 [27]，如图 2 所示。这样解决了彩色图像中偏光、背景复杂和多个人脸的检测的问题，而且对图像中人脸的色彩、位置、尺度、旋转、姿态和表情等具有不敏感性。

Sobottka 和 Pitas 提出了使用肤色和形状信息来定位人脸和提取面部特征的方法[28]。首先在 HSV 颜色空间中进行颜色分割以确定肤色区域，然后在粗糙的分辨率下进行区域增长以连接各肤色区域。对于每个连通区域，用几何矩的方法拟合出最佳的椭圆，并那些与椭圆相近的连通区域作为候选的人脸。接下来，在这些候选的区域中进行面部特征的搜索以确认它是否为人脸。J. C. Terrillon 等用一个高斯肤色模型来分类肤色象素 [29, 30] 。为了在二进制图像中描绘各种簇的形状特征，他们用 Fourier 和径向的 Mellin 变换来获取最低的 11 阶几何矩，然后再用一个神经网络来对这些提取出的几何矩进行学习。实验表明它能在 100 幅图像的测试集中达到 85%的检测率。此外，采用肤色信息的文章还有[31, 32,]等。

3.1.2 基于边缘特征

利用图像的边缘特征检测人脸时，其计算量相对要小的多，可以用来提高检测速度。大多数使用边缘特征的算法都是基于人脸的边缘轮廓相似于椭圆的特性，如 H.Kim 等提取边缘特征，利用建立的椭圆模板进行椭圆匹配来检测人脸[33]。Wang 等对椭圆模板进行了改进改进 [34]，采用一个椭圆环模型来代替椭圆，并加入了边缘的方向特征，实现了简单背景的人脸检测。但是利用椭圆特性进行计算时，椭圆的判断又增加了整个检测过程的计算量，抵消了边缘特征数量少的一些优势，阻碍了速度的提高。

B. Fröba 采用了基于 EOM (Edge-Orientation Matching)的方法[35, 36]，利用边缘强度信息建立一个 EOM 模板，在检测时进行模板匹配，他建立的一个模板如图 3 所示。虽然该算法在复杂背景下误检率比较高，但是与其他的特征相融合后获得了很好的效果[37]。其它基于知识模型的方法可以参见文献[38]。

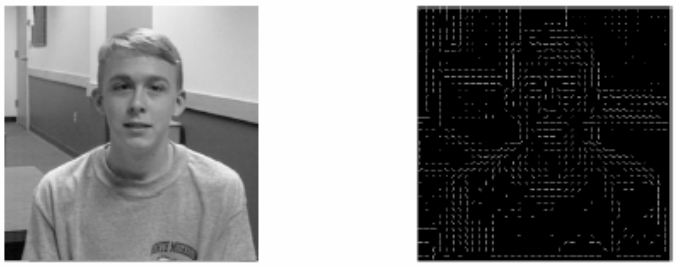


Fig. 3. Example of an edge orientation vector field [36](Courtesy of Bernhard Fröba).

图 3. 图像边缘方向的向量场示例。

肤色和边缘特征是计算量小的特征的一部分，其他的方法如 J.Miao 的变形模板匹配的方法[39]，由于特征计算简单，速度也较快。类似的方法还有[40, 41, 42,]等。

3.2 由粗到精的分层处理

B. Fröba 在[10]中采用了一种由粗到精的搜索策略，其思想是利用跳像素加大步长，体系结构如图 4 所示。具体来说在每一级金字塔结构的搜索中，先采用较大的步长搜索出可能的候选区域，再在这些区域周围加大搜索的分辨率，直到单个像素为止。该思想还先后被许多的学者所采用, 如[11,43]等。

有的学者还利用了人的头部轮廓特征进行分层处理。如 Craw 等首先在低分辨率图像中

使用一个轮廓模板匹配出人脸的大致范围，然后在高分辨率图像中使用 Sobel 算子获得边缘的位置和方向，并连接出完整的人脸轮廓[44]。H. Schneiderman 等也使用了多分辨率的信息复用和由粗到精的搜索策略提高检测速度 [9]。在这方面做出贡献的还有通过采用分级的方法减少检测过程中每级的计算量加快速度[45,46]，采用神经元网络系统实现快速的人脸检测[47]。

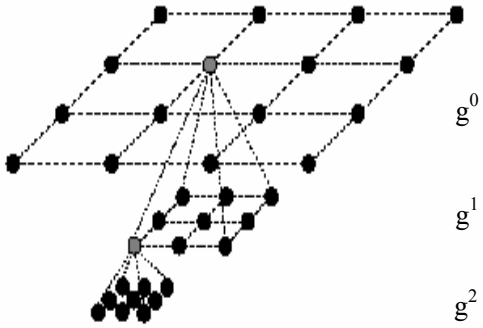


Fig.4. Example of the hierarchical grid search [10].

图 4. 网格分级搜索金字塔示意图。

3.3 多线程（multi-thread）的方法

Shpungin 使用了多线程的方法实现人脸跟踪[48]。该系统包括两个处理模块：第一个模块使用颜色、形状和一些动力学特征来决定人脸候选区域；第二个模块是一个神经网络分类器，任务是对第一个模块中得到的人脸候选区域进行确认。系统使用了多种先验信息和神经网络分类器，计算量比较大，因此影响了人脸跟踪速度。鉴于此，作者在该文中使用了多线程的方法对两个模块进行并行处理，这样系统能够及时把处理器资源分给不同的模块，从而在一定程度上解决了速度问题，使系统达到了实时。

3.4 降低特征空间的维数

C. J. Liu 提出了一种基于 Bayes 的特征判别人脸检测方法 (BDF) 并采用 PCA 进行降维以减小计算量 [49] 。他采用一个数据库进行训练，然后在不同的数据库上进行测试，结果表明该算法具有鲁棒的泛化能力。其特点在于用特征分析的方法提取出一个由输入图像、其一维的 Haar 小波表述及其幅值投影相结合而形成的高维特征向量, 如图 5 所示，然后采用 Bayes 分类器检测一幅图像中出现的多幅人脸。但是由于所得到的向量维数很高，例如在该文中采用的是 16×16 大小的图像作为训练集，其形成的特征向量共有 3×16×16=768 维。为了减少计算量，Liu 采用 PCA 将该向量的维数降到 10，这样计算量减小了 76.8 倍, 同时也提高了检测速度。Bernd Heisele 也使用了类似的方法[45]，将原来 283 维的灰度特征通过 PCA 降低到 100、60、30 分别进行实验，也在一定程度上提高了检测的速度。

3.5 神经网络预处理

为了检测平面内旋转的人脸，有的研究者采用了将图像进行不同角度的旋转以提高平面内旋转人脸的检测精度的方法，但是这样将降低检测的速度[39,50]。为此，Rowley 增加了一级

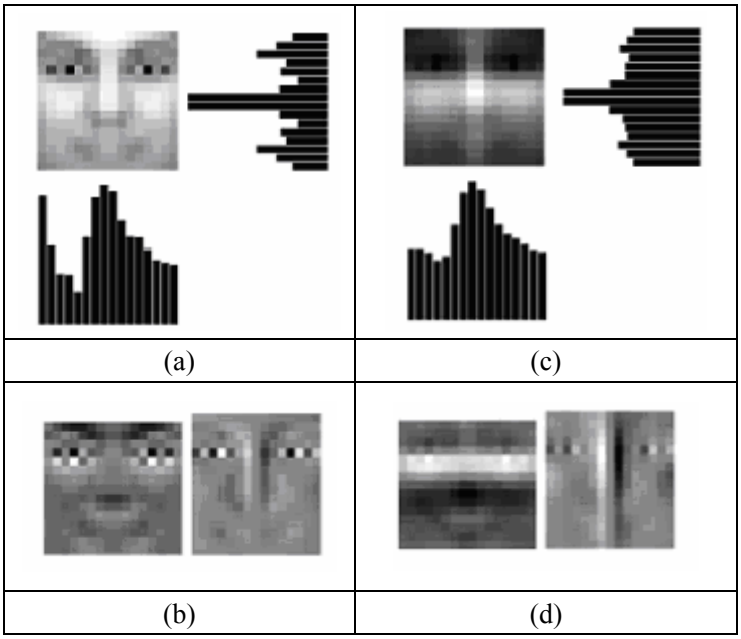


Fig. 5. Discriminating feature analysis of the mean face and the mean nonface. (a) The mean face and the two bar graphs are its amplitude projections; (b) 1D Harr wavelet representation of the mean face; (c) The mean nonface and its amplitude projections; (d) 1D Harr wavelet representation of the mean nonface [65]. (Courtesy of R. Lienhart)

图 5. 人脸的平均图像和非人脸的平均图像的判别特征分析：(a) 平均人脸图像和其在水平、垂直方向上的投影图；(b) 平均人脸图像的一维 Harr 小波表示；(c) 平均非人脸图像和其在水平、垂直方向上的投影图；(d) 非人脸图像的一维 Harr 小波表示。

神经网络用于检测平面内旋转的人脸角度，在对原图像进行反旋转后，送到正面人脸检测器中进行检测[51]，如图 6 所示。对于正面的人脸检测器，他采用了两个多层的神经元网络来从人脸和非人脸样本中学习它们各自的模型（如灰度值，像素的空间联系）。其正面人脸检测器由两部分组成：多个神经元网络组成的前端检测器和综合前端检测器的决策模型。为了检测旋转的人脸，他又采用了一个神经元网络，它对每个输入的子窗口中可能的人脸方向进行判决，并根据判决得到的人脸旋转角度对该窗口进行反旋转，再将该窗口送入正面人脸检测器进行检测。采用这种方法与只将图像在[-360^o, 360^o]内进行分步旋转以检测是否有人脸相比，速度提高了 17.6 倍[50]。

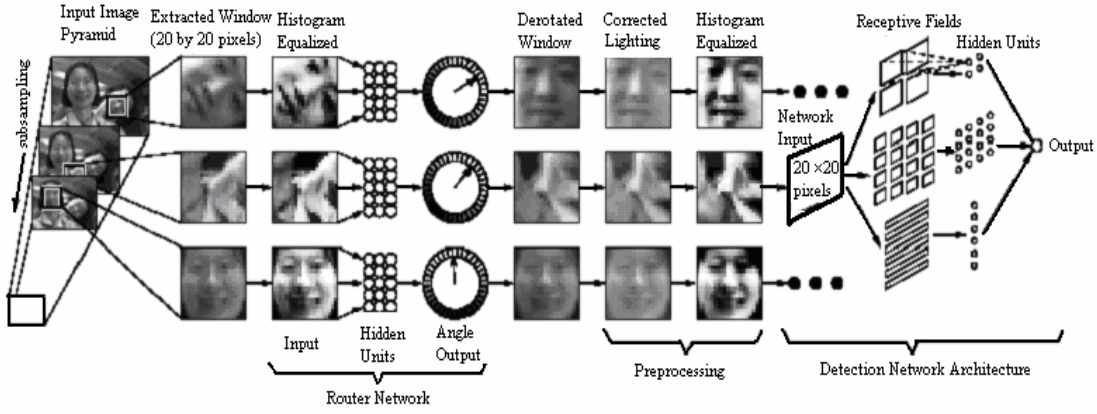


Fig. 6: Overview of the algorithm [51]. (Courtesy of H. Rowley)

图 6. 算法结构图。

在这方面还有陈泽宇等基于级联神经网络的人脸检测方法[52]，Juell 等基于人工神经网络的方法[53]，Kou Zani 等提出的基于人脸器官检测的多级网络方法[54]和 Anifantis 等提出的双输出人工神经网络的检测算法[55]等。

3.6 其他

此外，还有一些学者采用其它算法来达到提高速度的目的。如C. Sanderson提出了快速的特征提取方法[56]， Edgar Osuna提出了减少SVM在运行时的时间复杂度[59]， Jie Yang的人脸跟踪系统[58]， Kazumasa Murai的人脸检测系统[59]， Purdy Ho的旋转人脸检测系统[60]， Raphael Feraud的基于神经网络的人脸检测系统[61]， Ying Zhu的基于小波特征的算法[62]等等。

4. 转折点

在初始期和发展期内的文献表明，虽然经过从多学者们的共同努力，人脸检测的速度有了一定的提高，但相对于人脸检测的精度而言进步相对较慢。可以认为 P. Viola 的文章 [11] 的发表是人脸检测速度提高的一个转折点，他本人也在人脸检测的速度提高方面做出了突出贡献。他通过综合 Adaboost 和 Cascade 算法实现了实时的人脸检测系统，使得人脸检测从真正意义上走向实用[63]。

该文主要有以下几点贡献：

1、第一次引入了“积分图”的概念。这使得检测器中特征的计算非常快。如图 7 所示，坐标点(x, y)的积分图定义为其所对应的图中左上角的像素值之和$ii(x, y) = \sum_{x' \le x,\, y' \le y} i(x', y')$，其中$ii(x, y)$表示像素点$(x, y)$的积分图，$i(x, y)$表示原始图像。$ii(x, y)$通过下式迭代进行计算：$s(x, y) = s(x, y-1) + i(x, y)$，$ii(x, y) = ii(x-1, y) + s(x, y)$，其中$s(x, y)$表示行的积分和，且$s(x, -1) = 0$，$ii(-1, y) = 0$。求一幅图像的积分和，只需遍历一次图像即可。借助

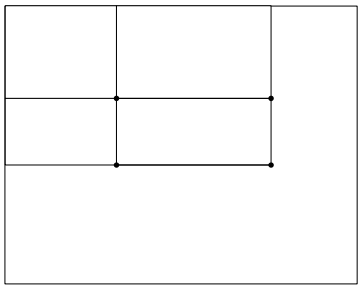


Fig. 7. Calculation of the integral image value: The value of the integral image at location 1 is to calculate the sum of the pixels in rectangle A. The value at location 2 is A+B, at location 3 is A+C, and at location 4 is A+B+C+D. The sum within D can be computed as 4+1-(2+3) [11]. (Courtesy of P. Viola)

图 7. 积分图元素值计算：点“1”的积分图的值是矩形框A中所有像素的像素值之和。点“2”的积分图所对应的值为A+B，点“3”是A+C，点“4”是A+B+C+D，所以D中所有的像素值之和可以用4+1-(2+3)计算。

于图7中使用的四个矩形，可以使用积分图计算任何矩形中所有像素的值之和。如图8所示，是他提出的四个Haar-Like特征。很明显，图8中由两个矩形构成的特征，其像素和之差可通过六个参考矩形求得；由三个矩形构成的特征可以通过八个参考矩形求得；由四个矩形构成的特征可以通过九个参考矩形求得。

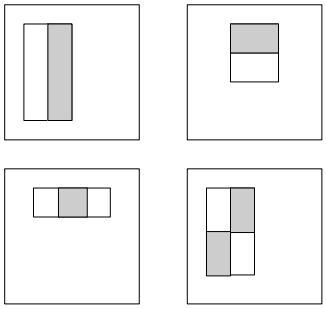


Fig. 8. Example rectangle features demonstrated in the enclosing detection window. The pixels sum within the white rectangles is subtracted from the pixels sum in the grey rectangles. Two-rectangle features are shown in (A) and (B). Figure (C) shows a three-rectangle feature, and (D) a four-rectangle feature [11]. (Courtesy of P. Viola)

图 8. 检测窗内的矩形特征例子。特征值的求法为白色矩形框内的所有像素点的和减去灰色矩形框中的所有像素点的和。(A)(B)表示的是两个矩形框的Harr-like特征，(C) 表示的是三个矩形框的Harr-like特征，(D)表示的是四个矩形框的Harr-like特征。

2、基于AdaBoost的学习算法。它能从一个很大的特征集中选择很小的一部分关键的特征，从而产生一个极其有效的分类器。最初的AdaBoost学习算法可用于提高一个简单的分类器（有时又称为弱分类器）的性能，它最终形成的强分类器的训练错误率接近于零，而且具有很好的推广性。Viola共定义了180,000种矩形特征，这个数远大于图像中像素的数目。每个特征都能很快计算出来，再通过试验选出一小部分作为特征以形成一个有效的分类器。要得到最终的强分类器，最重要的是如何找到这些特征。为此起见，每个弱分类器的设计都是从能对正例和反例进行正确分类的所有弱分类器的集合中选择错误率最小的一个。对每个特征而言，弱学习器决定弱分类器的最佳的门限值，使其具有最小的误分样本数。因此一个弱分类器 $h_j(x)$ 由一个特征 f_j，一个门限值 θ_j 和一个指示不等式方向的校验器 p_j 构成:

$h_j(x)=\begin{cases}1 & \text{if } p_j f_j(x) < p_j\theta_j \\ 0 & \text{otherwise}\end{cases}$ 其中 x 表示图像中一个 24×24 像素大小的子窗口，其大致的过程见表1。

Table 1. The Adaboost algorithm of classifier learning

表1 利用Adaboost算法学习的大致流程 [11]

- Given example set ***S*** and their initial weights ω_1;
- Do for *t*=1,……,T:
  1、 Normalize the weights ω_t;
  2、 For each feature, *j*, train a classifier h_j with respect to the weighted samples;
  3、 Calculate error, choose the classifier h_t with the lowest error;
  4、 Update weights ω_{t+1};
- Get the final strong classifier *h(x)*.

3、在级联的检测器中不断增加更多的强分类器。这可以很快排除背景区域，从而节约出时间用于对那些更像人脸的区域进行计算。该级联的分类器可视为一个智能的具有能集中注意力的机构，而不像以前的那些算法那样通过统计来保证去掉的那些区域不包括感兴趣的区域。该级联的检测器的结构如图 9 所示。

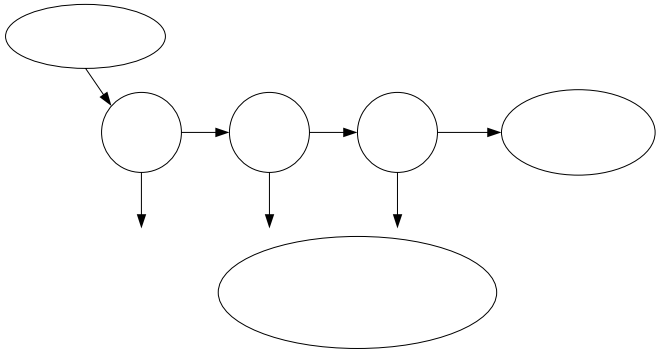


Fig. 9. The overview of the detection cascade. Each sub-window is scanned by a series of classifiers. A large number of negative examples are eliminated by the first classifier with very little processing. Subsequent layers eliminate additional negatives. The number of sub-windows has been reduced radically after several stages of processing. [11]. (Courtesy of P. Viola)

图 9. 分级分类器检测过程的示意图。在每个子窗口中都采用一系列的分类器进行计算。分级分类器中的第一级可以只使用非常少的计算量，去除大量的非人脸窗口。接下来的一些子分类器层进一步去除剩余部分中的非人脸窗口，但是需要更多的计算量。经过几级分类器的处理，候选人脸的子窗口数量急剧下降。进一步的处理可以使用任何的形式，比如其它增加分级分类器的级数或者用其他的检测系统替代。

该系统的检测率可以和当时最好的算法匹敌，但是检测速度却高达 15 帧／秒。

5．综合期

在 P. Viola 提出将 AdaBoost 算法用于人脸检测并取得了成功之后，更多的学者开始将注意力集中到 Boosting 算法上来，使得在提高人脸检测精度的同时也大幅度地提高了检测速度。

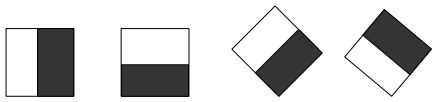
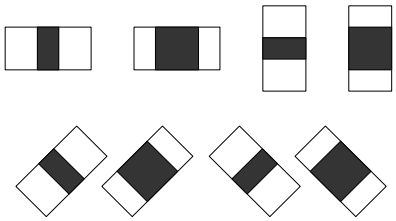
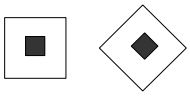
	
1.边缘特征(Edge features)	2、线性特征(Line features)
	
3、圆心环绕特征 (Center-surround features)	4、特定方向的特征 (Special diagonal line) feature used

Fig. 10. Feature prototypes of simple haar-like and center-surround features. Black areas have negative and white areas positive weights [43](Courtesy of Rainer Lienhart).

图 10. 简单的 Harr-like 特征和中心环绕特征的特征原型。在特征值的计算过程中，黑色区域的权值为负值，白色区域的权值为正值。

Rainer Lienhart 在 Viola 的基础上又提出了一些新的旋转 Haar-like 特征，如图 10 所示[43, 64, 65]。他通过学习得到的系统能够用于旋转人脸的快速检测，同时也能使平均的误检率降低 10%。此外他还研究了一些其他的 Boosting 算法，如：离散的(Discrete Adaboost)，实值的(Real Adaboost)和平缓的 (Gentle Adaboost)，通过比较得出基于平缓的(Gentle Adaboost)效果较好。

B. Froba在利用Adaboost算法的基础上提出了一种在灰度图像中进行正面和平面内旋转人脸的实时检测系统 [10] 。他是在以前EOM(edge orientation matching)正面人脸检测算法[36]的基础上进行的扩展，并且在其中引入了SNoW算法进行校验，从而得到了一个更为鲁棒的人脸检测系统。在Athlon1000MHz的机器上，处理一幅大小为384×288图像只需要0.05秒钟。

Stan Z. Li 提出了一种基于 FloatBoost 的多视角的人脸检测算法 [66, 67] 。通过利用 FloatBoost 将学到的弱分类器构造成一个强分类器，该系统是一个从粗到精、从简单到复杂的金字塔型的人脸检测系统。同基于 AdaBoost 的算法相比，它能在提高人脸检测速度的同时提高检测的精度。为了检测具有各种深度旋转角度的人脸，他们将各种角度的人脸进行了分类。值得一提的是它还是第一个实时的多角度人脸检测系统。在 Pentium-III、700 MHz 的 CPU 上检测一幅大小为 320×240 的图像只需要 200ms。此外，他们还提出了一种实时的多视角的人脸检测、跟踪、姿态估计、对齐和识别的综合系统[68]。

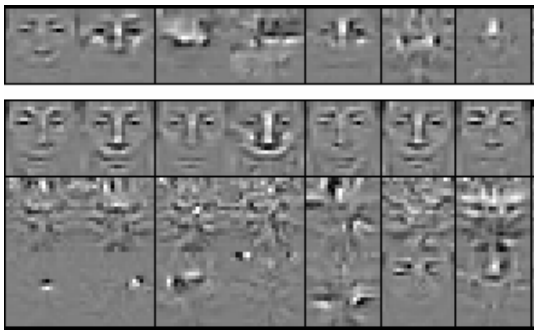


Fig. 11. Face features found by Kullback-Leibler Analyses (KLA). The first row lists some features sequentially found in KLBoosting. The second, third and last rows are “global semantic”, “global but not semantic” and “local” features, respectively [69]. (Courtesy of C. Liu)

图 11. 通过 K-L 分析获得的人脸特征。第 1 行列出了一些 KLBoosting 学习到的特征。第 2、3 行分别是“全局的具有明显语义的特征”、“全局的但不具有明显语义的特征”和“局部的特征”等。

C. Liu 等人提出了一种基于 Kullback-Leibler Boosting (KLB)算法构造的一个紧凑的(compact) 分类器 [69] 。该算法解决了 AdaBoost 算法中存在的两个问题：第一，怎样根据学习得到的系数对弱分类器进行最佳的组合，其解决的策略是通过迭代调整系数以最小化人脸检测的错误率，它能保证在特征不断增多的情况下检测的错误率不会增加；第二，怎样选择最好的弱分类器或特征，其策略是寻找使人脸和非人脸之间的 KL 散度的对称性最大化的 KL 特征，通过最优的特征来构造最优的分类器，一些学习得到的 KL 特征如图 11 所示。利用该算法得到的检测器在 CMU 的正面人脸测试库上的测试结果见表二。

P. Viola 本人也在接下来的工作中对 Adaboost 进行了一些改进 [70] ，提出了一种不对称的 Adaboost 算法，可以用于快速的图像检索和人脸检测。此外还有 Zhang 提出的基于 Boosting 的多视角的人脸检测[71]，Sahbi 提出的综合 SVM 和分级的方法进行人脸检测的系统[72,73]等。

目前基于人脸检测的算法主要针对正面端正的人脸。评估不同方法的性能需要共同的测试集, 而 CMU 测试集[74] 是目前比较公认的测试集。表 2 列出了几个具有代表性的算法在

该测试集上的检测结果统计和相应的检测速度。需要指出的是，由于人脸检测问题本身的复杂性，加之不同方法往往具有不同的针对性，因此表 2 所列数据并不是为了比较各种方法的优劣，而是用来说明目前的研究所达到的大致水平[8]。

Table 2. Some parameters of different methods (appear according to the time of being printed)

表 2 各种方法的一些相关参数（按文章发表的时间排列）

Methods	Velocity (frame/second)	Detection rate (%)	False alarms	Reference		
				Image size (by pixels)	Configuration of computer	The year of being printed
H. Rowley [17]	1	86.0	31	320×240	－	1998
H. Schneiderman [9]	0.2	94.4	65	320×240	－	2000
Y. Zhu [75]	～1①	No performance improvement over [75]		320×240	PC 300MHz	2000
R. Feraud [61]	1②	74.7	46	108×108－1024×1024	DEC Alpha 333MHz	2001
P. Viola [11]	15	92.1	50	384×288	PIII700MHz	2001
R. Lienhart [43]	5	82.3	24	320×240	P4 2GHz	2002
Stan Z. Li [67]	5	90.2	31	320×240	PIII 700MHz	2002
C.J. Liu [49]	1	97.4	1	320×240	900MHz Sun Blade 1000 workstation	2003
C. Liu [69]	2.5	95.0	10^{-6} ③	320×240	P4, 1.8GHz	2003
B. Fröba [10]	25	89.7④	22④	320×240	Athlon1000MHz	2003

①Denote that the detector can run at 1frame per second on the images of 320×240, approximately;

②It is the average velocity while the detector runs on the images ranging from 108×108 to 1024×1024;

③Only the false rate is given instead of the false alarms;

④It is acquired by the ROC curves in this paper.

①表示该算法检测一幅 320×240 大小的图片时，其速度大约 1 帧 / 秒；

②是在 13,182 幅大小在区间[108×108-1024×1024]内变化的图像库上测试后的平均处理时间。

③该文中只给出了错误警告率，没有给出误检的非人脸个数；

④是根据该文中给出的 ROC 曲线得到的。

6 总结与展望

本文从人脸检测速度发展的角度，结合近年来人脸检测问题上的研究，综述了人脸检测问题的研究现状。人脸检测问题的内涵十分广泛，需要解决的问题很多，实现通用的方法还存在一些困难。现在的研究通常是针对特定约束条件下或某种应用背景下提出解决方法。由于速度是几乎所有应用中都必须考虑的问题，因此也越来越引起研究者的重视。

总的来说，基于 Boosting 和 Cascade 算法的系统在速度方面具有很大的优越性。它是在提出的一系列 Haar-like 特征的基础上，通过 Boosting 算法学习一些弱分类器，再组合成一个强分器。但一般一个强分类器还不足以圆满完成任务，还要级联一系列这样的强分类器，如图 4 所示。但是要进一步提高检测精度，就需要级联更多的强分类器，但是这样又会降低检测速度。我们认为一方面可以采用更好的、计算却更简单的图像特征表述方法；另一方面

就是综合 Adaboost 和一些强分类器：在 Adaboost 学习的过程中，可以提高正例学习的阈值，如可以将每级常采用的正检率阈值（一般设为 98.5%）适当增加，当然误检的非人脸会相应增加，这样学习得到的一些弱分类器组合后形成的强分类器作为分级分类器的前面几级，最后再用一个强分类器进一步过滤。由于在前几级消除了大多数的非人脸，因此通过最后一级强分类器的窗口将大大减少。这样可以获得一个既提高检测速度又提高检测精度的系统。在这一方面 Bernhard Froba 已进行了一些尝试，并取得了较好的效果[10]。

目前主流的算法大多是基于统计的，因此受学习样本的影响较大。不同的样本备制方法会使同一个算法的性能具有很大的区别[76]。因此我们也期待能有一些相关的文献的出现。而且还有学者提出了采用统一的训练集的愿望[77]，希望能将更多的精力集中在算法的研究和比较上。

目前复杂背景图像中的正面人脸检测算法已经有了比较好的结果。多姿态的人脸检测问题也取得了一些进展[9, 10, 66, 67, 68]，这方面的研究是目前的重点之一。随着 3D 人脸研究的深入，利用 3D 信息解决姿态问题和光照问题也是一个比较有潜力的方向，有待进一步地研究。

基于学习的方法是将一个样本作为一个向量，这样所有的样本构成了一个向量集，再通过统计的方法来确定所有的这些向量在相应的样本空间中的分布情况。但是这是对某个样本向量的整体考虑，而没有考虑单个向量（它所对应的是人脸）内部的信息，也就是样本向量内部相互之间的某种关系。但人脸本身却是具有很强的结构信息的，基于结构的方法正是考虑了人脸样本（向量）的这种规则性。而就人本身认识事物来说，都利用了人脸的这些结构信息，人甚至还能通过一幅图像中看到的人面部的某些部位来推测它是否是人的某个器官，以及判断人脸的存在。因此，将来的一个可能的方向是基于结构知识和统计学习相结合，以及再利用人的推理机制（人工智能）来对一些复杂的情况进行求解，比如严重的遮挡（遮挡面积达到面部的 80%以上），恶劣的光照，恶劣的图像质量等情况。

精度和速度是一个人脸检测系统的两个重要方面，一般都希望一个系统既能有很高的精度又能达到实时的速度。但是实际研究中这两方面又常常存在矛盾。一般是在精度不能满足的条件下，牺牲速度来满足精度。在研究中如何能在保证精度的前提下，有效地提高系统的速度，对人脸检测的研究有很重要的意义。充分利用前人已有的加速方法是本文论述的一个主要目标。

总之，随着研究的进一步发展，系统的精度和速度会不断提高，推动人脸检测逐步走向实际应用。

7.致谢

该论文的研制工作得到国家 863 计划项目(资助合同号 2001AA114190, 2002AA118010)、银晨智能识别科技有限公司、国家自然科学基金重点项目“基于生物特征的身份识别研究”(批准号：60332010)、多媒体与智能软件技术北京市重点实验室开放课题(编号：KP0706200377)、国家“973”计划基金资助项目(2001CCA03300)、国家“863”计划基金资助项目(2001AA114160)、北京市自然科学基金资助项目(D070601-01)、北京市教委资助项目(P070701-01,P070702-01)多项资助，在此表示衷心的感谢。

Reference:

[1] Chellappa R，Wilson CL，Sirohey S. Human and machine recognition of faces：A survey. Proceedings of the IEEE，1995，83(5)：705~740.

[2] Zhou J，Lu CY，Zhang CS. A survey of automatic face recognition. ACTA Electronica Sinica，2000，28(4)：102~106(in Chinese with English abstract).
[3] Samaria FS. Face Recognition Using Hidden Markov Models. PhD thesis, Univ. of Cambridge, 1994.
[4] Belhumeur P, Hespanha J, Kriegman D. Eigenfaces vs. Fisher faces: Recognition Using Class Specific Linear Projection. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 19, no. 7, pp. 711~720, 1997.
[5] Lu CY. Research on some issues of face recognition and system implementation [PhD dissertation]. Tsinghua University, Beijing, 1998(in Chinese with English abstract).
[6] Yang MH, Kriegman D, Ahuja N. Detecting faces in images: A survey. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24 (1): 34~58.
[7] Hjelmas E. Face Detection: A Survey. Computer Vision and Image Understanding 83,236~274(2001).
[8] Liang LH, AI HZ, Xu Z, Zhang B. A Survey of Computer Science. Chinese Journal of Computer,2002,25(5):527~532(in Chinese with English abstract).
[9] Schneiderman H, Kanade T. Probabilistic modeling of local appearance and spatial relationships for object recognition. In: Proc IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Santa Barbara, California, 1998.45~51.
[10] Fröba B, A. Ernst. Fast Frontal-View Face Detection Using a Multi-Path Decision Tree. In Proc. Audio- and Video-based Biometric Person Authentication (AVBPA '2003), pp. 921~928, 2003.
[11] Viola P. Rapid object detection using a Boosted cascade of simple features. In: Proc IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp:511~518, 2001.
[12] Sung K，Poggio T. Example-based learning for view based human face detection. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence，1998，20(1)：39~51.
[13] Yang MH, Roth D, Ahuja N. A SNoW-Based Face Detector. Advances in Neural Information Processing Systems 12, S.A. Solla, T. K. Leen, and K.-R. Muller, eds., pp. 855~861, MIT Press, 2000.
[14] Rot D. Learning to Resolve Natural Language Ambiguities: A Unified Approach. Proc. 15th Nat'l Conf. Artificial Intelligence, pp. 806~813, 1998.
[15] Carleson A, Cumby C, Rosen J, and Roth D. The SNoW Learning Architecture. Technical Report UIUCDCS-R-99-2101, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign Computer Science Dept., 1999.
[16] Littlestone N. Learning Quickly when Irrelevant Attributes Abound: A New Linear-Threshold Algorithm. Machine Learning, vol. 2, pp. 285~318, 1988.
[17] Rowley H, Baluja S, and Kanade T. Neural Network-Based Face Detection. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 20, no. 1, pp. 23~38, Jan. 1998.
[18] Colmenarez AJ, Huang TS. Face Detection with Information-Based Maximum Discrimination. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition. pp. 782~787, 1997.
[19] Schneiderman H. A statistical method for 3D object detection applied to faces and cars. In International Conference on Computer Vision, 2000
[20] Osuna E, Freund R, and Girosi F, Training Support Vector Machines: An Application to Face Detection. Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 130~136, 1997.

[21] Jones MJ,. Rehg JM. Statistical color models with application to skin detection. Technical report, Cambridge Res. Lab., Compaq Computer Corp., 1998.

[22] Martinkauppi B. Face colour under varying illumination-analysis and applications. PhD thesis , University of Oulu, 2002.

[23] Terrillon JC, Shirazi M N, Fukamachi H, and Akamatsu S. Comparative performance of different skin chrominance models and chrominance spaces for the automatic detection of human faces in color images. Proc. IEEE Int'l Conf. on Face and Gesture Recognition, pp. 54-61, 2000.

[24] Hadid A, Pietikainen M, Martinkauppi B. Color-based face detection using skin locus model and hierarchical filtering, ICPR02 (IV: 196~200).

[25] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Real-Time Tracking of Non-Rigid Objects using Mean Shift. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'00), Hilton Head Island, South Carolina, Vol. 2, 142~149, 2000.

[26] Comaniciu D, Ramesh V. Robust Detection and Tracking of Human Faces with an Active Camera. IEEE Int. Workshop on Visual Surveillance, Dublin, Ireland, 11~18, 2000.

[27] Hsu RL, Abdel-Mottaleb M, A K Jain. Face detection in color images. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 24, no. 5, pp. 696~706, May 2002.

[28] Sobottka K and Pitas I. Face Localization and Feature Extraction Based on Shape and Color Information. Proc. IEEE Int'l Conf. Image Processing, pp. 483~486, 1996.

[29] Terrillon JC, David M,. Akamatsu S. Automatic Detection of Human Faces in Natural Scene Images by Use of a Skin Color Model and Invariant Moments. Proc. Third Int'l Conf. Automatic Face and Gesture Recognition, pp. 112~117, 1998.

[30] Terrillon JC, David M, Akamatsu S. Detection of Human Faces in Complex Scene Images by Use of a Skin Color Model and Invariant Fourier-Mellin Moments. Proc. Int'l Conf. Pattern Recognition, pp. 1350~1355, 1998.

[31] Garcia C, Tziritas G. Face detection using quantized skin color regions merging and wavelet packet analysis. IEEE Trans Multimedia, 1999,1(3):264~277.

[32] Yang MH, Ahuja N. Detecting human faces in color images. In: Proc IEEE Conference on Image Processing, Chicago, 1998. 127~139.

[33] Kim H, Kang W, Shin J, Park S. Face Detection Using Template Matching and Ellipse Fitting. IEICE Trans. Inf. & Syst., Vol.E38-D, No.11, pp2008~2011, Nov 2000.

[34] Wang J, Tan T. A new face detection method based on shape information. PRL, vol. 21, pp. 463~471, 00.

[35] Fröba B, Küblbeck C. Orientation Template Matching for Face Localization in Complex Visual Scenes. International Conference on Image Processing ICIP2000, 251~254, 2000.

[36] Fröba B, Küblbeck C. Real-Time Face Detection using Edge-Orientation Matching. Audio- and Video-based Biometric Person Authentication (AVBPA'2001), 78~83, 2001.

[37] Fröba B, Zink W. On the Combination of Different Template Matching Strategies for Fast Face Detection. Multiple Classifier Systems (MCS'2001), 418~428, 2001.

[38] Govindaraju V, Srihari SN, Sher DB. A computational model for face location. In: Proc IEEE Conference on Computer Vision, Osaka, Japan, 1990. 718~721.

[39] Miao J, Yin BC, Wang KQ et.al. A hierarchical multiscale and multiangle system for human face detection in a complex back-ground using gravity-center template. Pattern Recognition, 1999, 32(10): 1237~1248.

[40] Lu CY, Zhang CS, Wen F. et al. Fast face detection method based on region features. Journal

of Tsinghua University, 1999, 39 (1): 101~105(in Chinese with English abstract).
[41] Liang LH, Ai HZ, He KZ. Multi-template-matching-based single face detection. Chinese Journal of Image and Graphics, 1999, 4 A (10): 823~830(in Chinese with English abstract).
[42] Liu MB, Yao HX, Gao W. Real-time face tracking method in color images. Chinese Journal of Computer,1998,21(6):527~532(in Chinese with English abstract).
[43] Lienhart R, Maydt J. An Extended Set of Haar-like Features for Rapid Object Detection IEEE ICIP 2002, Vol. 1, pp 900~903, 2002(in Chinese with English abstract).
[44] Craw I, Ellis H, Lishman J. Automatic extraction of face features. Pattern Recognition Letters, 1987, 5(2):183~187.
[45] Heisele B, Serre T, Prentice S, Poggio T. Hierarchical Classification and Feature Reduction for Fast Face Detection with Support Vector Machines. Pattern Recognition, Vol. 36, No. 9, 2007~2017, 2003.
[46] Heisele B, Serre T, Mukherjee S and Poggio T. Feature Reduction and Hierarchy of Classifiers for Fast Object Detection in Video Images. Proceedings of 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'2001), Kauai, Hawaii, Vol. 2, 18~24, December 2001.
[47] Garcia C, Delakis M. A Neural Architecture for Fast and Robust Face Detection. Proc. of the IEEE-IAPR International Conference on Pattern Recognition (ICPR'2002), Volume 2, pages 40~43.
[48] Boris E Shpungin, Javier R. Movellan. A Multi-Threaded Approach to Real Time Face Tracking. UCSD MP Lab TR 2000 , July 2000.
[49] Liu CJ. A Bayesian Discriminating Features Method for Face Detection. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 25, no. 6, pp. 725~740, 2003.
[50] Rowley HA. Neural Network-Based Face Detection. PhD thesis, Carnegie Mellon Univ., 1999.
[51] Rowley H, Baluja S, Kanade T. Rotation Invariant Neural Network-Based Face Detection. Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 38~44, 1998.
[52] Chen ZY, Qi FH. Cascading Neural Networks-based human face detection. Joural of Infrated Millim. Waves, Vol. 19, No.1 February, 2000 pp: 57~61.
[53] Juell P, Marsh R. A hierarchical neural network for human face detection. Pattern Recognition, 1996, 29(5) :781~787.
[54] Kouzani AZ, He F, Sammut K. Commonsense knowledge-based face detection. In: Proc Conference on Intelligent Engineering Systems, Budapast, Hungary, 1997. 215~220.
[55] Anifantis D, Dermatas E, Kokkinakis G. A neural network method for accurate face detection on arbitrary images. In: Proc Conference on Electronics, Circuits and Systems, Pafos, Cyprus, 1999, 1:109~112.
[56] Sanderson C, Paliwal KK. Fast Features for Face Authentication under Illumination Direction Changes. Pattern Recognition Letters 24 (14) 2003.
[57] Osuna E, Girosi F. Reducing the run-time complexity of Support Vector Machines. ICPR'98, Brisbane, Australia, 16~20 Aug., 1998.
[58] Yang J. Real time Face and Facial Feature Tracking and Applications_AVSP98-jie.
[59] Murai K and Nakamura S. Real Time Face Detection for Multimodal Speech Recognition. Proc. of ICME2002(International Conference on Multimedia and Expo), Vol.2, pp.373~376, 2002.
[60] Purdy H. Rotation Invariant Real-time Face Detection and Recognition System, MIT

AIM-2001-010, May 31, 2001.
[61] Feraud R, Olivier J Bernier, Viallet J, and Collobert M. A Fast and Accurate Face Detector Based on Neural Networks. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 23, No. 1, JANUARY 2001.
[62] Wu HY, Chen Q, Yachida M. A fuzzy-theory-based face detector. In: Proc Conference on Pattern Recognition, Vienna, Austria, 1996,3:406~410.
[63] Viola P, Jones M. Robust real time object detection Technical Report. CRL 2001/01, Compaq Cambridge Research Laboratory, February 2001.
[64] Lienhart R, Kuranov A, V Pisarevsky. Empirical analysis of detection cascades of boosted classifiers for rapid object detection. DAGM'03 25th Pattern Recognition Symposium 2003.
[65] Lienhart R, Liang L, and Kuranov A. A detector tree of boosted classifier for real time object detection and tracking. IEEE International Conference on Multimedia & Expo (ICME2003)
[66] Li SZ, Zhu L, Zhang ZQ, Zhang HJ. Learning to Detect Multi-View Faces in Real-Time. In Proceedings of the 2nd International Conference on Development and Learning. Washington DC. June, 2002.
[67] Li SZ, Zhu L, Zhang ZQ, Blake A, Zhang HJ, Shum H. Statistical Learning of Multi-View Face Detection. In Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision. Copenhagen, Denmark. May, 2002.
[68] Li SZ, Zou XL, Hu YX, Zhang ZQ, Yan SC, Peng XH, Huang L, Zhang HJ. Real-Time Multi-View Face Detection, Tracking, Pose Estimation, Alignment, and Recognition. CVPR 2001 Demo Summary. Hawaii. December, 2001.
[69] Liu C, Shum HY. Kullback-Leibler Boosting. Proceedings of the 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'03). 2003.
[70] Viola P. Fast and Robust Classification using Asymmetric AdaBoost and a Detector Cascade NIPS 2001: 1311-1318.
[71] Zhang ZQ, Li M, Li SZ, Zhang HJ. Multi-view face detection with floatboost. WACV02(184-188). IEEE Top Reference. 0303 Bib Ref.
[72] Sahbi H. Coarse-to-Fine Support Vector Machines for Hierarchical Face Detection. PhD Thesis, University of Versailles, April 2003.
[73] Sahbi H, Geman D, Boujemma N. Face Detection Using Coarse-to-Fine Support Vector Classifiers In the IEEE, International Conference on Image Processing, ICIP 2002.
[74] Sun QB, Huang WM, Wu JK. Face detection based on color and local symmetry information. In: Proc Conference Automatic Face and Gesture Recognition, Nara, Japan, 1998. 130~135
[75] Zhu Y, Schwartz S, Orchard M. Fast Face Detection Using Subspace Discriminant Wavelet Features. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'00)-Volume 1 p.1636.
[76] Phillips PJ, Moon H, Rizvi SA, Rauss PJ. The FERET Evaluation Methodology for Face-Recognition Algorithms. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22, no. 10, pp. 1090~1034, Oct. 2000.
[77] Alvira M, Rifkin R. An empirical comparison of SNoW and SVMs for face detection. MIT press 2001.

附中文参考文献：

[2] 周杰，卢春雨，张长水等. 人脸自动识别方法综述. 电子学,2000,28(4):102~106.
[5] 卢春雨.人脸自动识别若干问题研究与系统实现[博士学位论文].清华大学,北京,1998.
[8] 梁路宏,艾海舟,徐光,张钹. 人脸检测研究综述 计算机学报,2002,25(5): 449~458.

[41] 卢春雨,张长水,闻方等.基于区域特征的快速人脸检测法.清华大学学报(自然科学版),1999,39(1): 101~105.
[42] 梁路宏,艾海舟,何克忠. 基于多模板匹配的单人脸检测. 中国图象图形学报,1999,4A(10):823~830.
[43] 刘明宝,姚鸿勋,高文. 彩色图像的实时人脸跟踪方法. 计算机学报,1998,21(6):527~532.
[44] 陈泽宇,戚飞虎. 基于级联神经网络的人脸检测方法的研究. 红外与毫米波学报,2000,19(1):57~61.