

TECHNOLOGY AND METHOD OF FACE DETECTION

# 人脸检测技术与方法

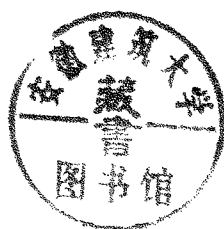
郭 耸 李常有 著



东北大学出版社  
Northeastern University Press

# 人脸检测技术与方法

郭 耸 李常有 著



东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 郭耸 李常有 2017

图书在版编目 (CIP) 数据

人脸检测技术与方法 / 郭耸, 李常有著. — 沈阳 :  
东北大学出版社, 2017. 7

ISBN 978-7-5517-1636-9

I. ①人… II. ①郭… ②李… III. ①面—图像识别  
—研究 IV. ①TP391.413

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 186232 号

---

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83683655(总编室) 83687331(营销部)

传真: 024-83687332(总编室) 83680180(营销部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: [neuph@neupress.com](mailto:neuph@neupress.com)

印 刷 者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 240mm

印 张: 7.75

字 数: 139 千字

出版时间: 2017 年 7 月第 1 版

印刷时间: 2017 年 7 月第 1 次印刷

责任编辑: 孟 颖

责任校对: 子 敏

封面设计: 潘正一

责任出版: 唐敏志

---

ISBN 978-7-5517-1636-9

定 价: 49.00 元

# 前言



人脸检测 (Face Detection) 是指采用一定的算法或策略对任意的输入图像或图像序列进行搜索遍历, 从而判断其中是否包含人脸。如果包含人脸, 则定位出每个人脸的位置、大小以及姿态。人脸检测是人脸信息处理中的一个关键环节, 是自动人脸识别的前提和基础, 人脸检测性能的好坏, 直接影响着人脸信息识别的结果。目前, 人脸检测已经广泛应用于生物特征识别、视频监控、人机交互、安防系统、内容检索及电视会议等领域。

本书针对人脸检测中存在的问题与难点, 对人脸检测的关键技术和方法进行了深入的探索与阐述, 并给出了解决人脸检测的预处理、正面人脸检测、多姿态人脸检测以及部分遮挡人脸检测问题的一些方法, 希望能够为人脸检测的相关研究提供一些参考。全书共分 6 章: 第 1 章, 对人脸检测技术和方法进行了综述。首先介绍了课题研究的目的和意义, 人脸检测的概念及其主要的应用领域; 然后简单介绍了人脸检测算法的分类及几种经典的人脸检测算法, 并对人脸检测的国内外研究现状进行总结与分析, 最后给出了本书的主要内容以及组织结构。第 2 章, 给出了利用 EMD (Empirical Mode Decomposition)\* 的自适应图像去噪方法, 基于肤色相似度和动态阈值相结合的肤色分割算法。EMD 的自适应图像去噪方法首先对噪声图像按照列、行、左对角和右对角方向一维展开, 分别进行 EMD 处理, 采用基于噪声标准差的自适应阈值对各个 IMF 进行局部硬阈值去噪, 将去噪后的 IMF 进行反变换, 分别获得按照四个方向展开所对应的去噪后图像, 然后将它们加和平得到去噪后图像。该方法能够有效地去除图像的噪声并保留足够的图像细节。基于肤色相似度和动态阈值相结合的肤色分割算法首先在  $YC_gCr$  色彩空间计算肤色相似度, 然后给出一种基于类间方差和类内离散度相结合的动态阈值确定方法, 并根据求得的动态阈值对输入图像进行肤色分割。该算法具有较强的适应性, 能够较好地克服光照变化的影响, 明显改善肤色分割性能, 对提高人脸检测的速度与性能起到关键的作用。第 3 章, 给出基于样本非对称性的 AdaBoostSVM 人脸检测算法 (SA-AdaBoostSVM 算法)。该算法在

评估每个弱分类器的重要性时,其评价系数不仅决定于错误率,还考虑了该弱分类器对人脸样本的识别能力,从而增大了人脸样本在训练中的作用。这一算法可以提高人脸检测分类器的训练收敛速度,明显改善正面人脸检测的性能与速度。第4章,给出一种基于多特征融合与改进的决策树级联结构相结合的多姿态人脸检测算法。该算法首先对边缘方位场特征进行改进,给出基于形态学梯度的边缘方位场特征,然后将其与 Haar-like 特征和三角积分特征相融合,对 SA-AdaBoostSVM 算法进行训练。同时,该算法还对决策树级联结构进行改进,在训练和检测阶段,允许边界邻域范围内的人脸样本同时进入决策树级联结构的两个分支。该算法能够充分发挥不同特征的互补优势,达到速度和性能的全面改善,为更好地解决多姿态人脸检测问题提供一种较为有效的方法。第5章,给出基于组件距离匹配度函数的部分遮挡人脸检测算法。该算法首先采用 SA-AdaBoostSVM 算法对人脸的核心组件(左眼、右眼、鼻子、嘴)进行检测,然后采用基于组件距离匹配度函数的方法对检测出来的组件进行整合验证,进而实现部分遮挡人脸的定位与检测。该算法能够提高部分遮挡人脸的检测性能与速度。第6章,对本书的研究内容进行总结与展望。

本书主要由沈阳建筑大学信息与控制工程学院郭耸在其攻读博士学位期间取得的研究成果的基础上撰写而成,参与本书撰写工作的还有东北大学机械工程与自动化学院的李常有。

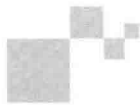
本书的出版得到了以下项目的资助:国家自然科学基金面上项目(51575095),国家自然科学基金青年项目(No. 51005041),住房和城乡建设部科研开发项目(No. 2012—K8—29),辽宁省教育厅科学技术研究项目(No. L2011092),沈阳建筑大学科研基金青年基金项目(No. 2011202),以及沈阳建筑大学学科涵育项目(No. XKHY2—76)。

感谢对本书撰写及相关工作给予大力支持和帮助的各位专家和学者!由于作者水平有限,书中难免存在不少问题和不足,敬请广大读者批评指正。

郭耸 李常有

2017年3月

# 目 录



|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 第 1 章 人脸检测技术综述 .....                 | 1  |
| 1.1 人脸检测技术研究的目的和意义 .....             | 1  |
| 1.2 国内外研究现状 .....                    | 2  |
| 1.2.1 人脸检测方法分类及评价指标 .....            | 3  |
| 1.2.2 经典人脸检测算法 .....                 | 6  |
| 1.2.3 当前人脸检测研究进展 .....               | 10 |
| 1.3 现有方法存在的问题与不足 .....               | 16 |
| 1.4 本书内容与组织结构 .....                  | 18 |
| 1.4.1 本书内容 .....                     | 18 |
| 1.4.2 组织结构 .....                     | 19 |
| 第 2 章 图像去噪与肤色分割预处理 .....             | 22 |
| 2.1 引言 .....                         | 22 |
| 2.2 利用 EMD 的自适应图像去噪处理 .....          | 23 |
| 2.2.1 Hilbert-Huang 变换及 EMD 算法 ..... | 24 |
| 2.2.2 基于 EMD 的去噪算法及其不足 .....         | 27 |
| 2.2.3 利用 EMD 的自适应图像去噪算法 .....        | 29 |
| 2.3 基于肤色相似度和动态阈值的肤色分割算法 .....        | 33 |
| 2.3.1 色彩空间转换 .....                   | 34 |
| 2.3.2 肤色相似度计算 .....                  | 35 |
| 2.3.3 动态阈值的确定 .....                  | 36 |
| 2.3.4 肤色区域分割与形态学后处理 .....            | 38 |

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 2.4 实验结果与分析 .....                           | 39 |
| 2.4.1 图像去噪实验 .....                          | 39 |
| 2.4.2 肤色分割实验 .....                          | 44 |
| 2.5 本章小结 .....                              | 47 |
| <br>第3章 基于 SA-AdaBoostSVM 算法的正面人脸检测研究 ..... | 48 |
| 3.1 引言 .....                                | 48 |
| 3.2 AdaBoost 人脸检测算法 .....                   | 49 |
| 3.2.1 Haar-like 特征 .....                    | 49 |
| 3.2.2 AdaBoost 算法 .....                     | 50 |
| 3.2.3 级联结构 .....                            | 51 |
| 3.3 SA-AdaBoostSVM 算法 .....                 | 52 |
| 3.3.1 AdaBoostSVM 算法及其不足 .....              | 53 |
| 3.3.2 算法改进的策略与理论依据 .....                    | 54 |
| 3.3.3 SA-AdaBoostSVM 算法描述 .....             | 58 |
| 3.4 基于 SA-AdaBoostSVM 算法的正面人脸检测 .....       | 59 |
| 3.4.1 正面人脸检测分类器的训练与测试流程 .....               | 59 |
| 3.4.2 输入图像的正面人脸检测 .....                     | 60 |
| 3.5 实验结果与分析 .....                           | 61 |
| 3.5.1 SA-AdaBoostSVM 算法的速度与性能验证 .....       | 61 |
| 3.5.2 输入图像的正面人脸检测实验 .....                   | 64 |
| 3.6 本章小结 .....                              | 66 |
| <br>第4章 基于多特征融合与改进的决策树级联结构的姿态人脸<br>检测 ..... | 68 |
| 4.1 引言 .....                                | 68 |
| 4.2 多特征的引入与改进 .....                         | 69 |
| 4.2.1 三角积分特征 .....                          | 70 |
| 4.2.2 基于形态学梯度的边缘方位场特征 .....                 | 72 |

|                                             |            |
|---------------------------------------------|------------|
| 4.3 基于多特征融合的 SA-AdaBoostSVM 算法 .....        | 74         |
| 4.4 改进的决策树级联结构 .....                        | 76         |
| 4.4.1 多姿态人脸检测器级联结构 .....                    | 76         |
| 4.4.2 改进的决策树级联结构 .....                      | 78         |
| 4.4.3 多姿态人脸检测 .....                         | 79         |
| 4.5 实验结果与分析 .....                           | 81         |
| 4.5.1 多特征融合的 SA-AdaBoostSVM 算法的人脸检测实验 ..... | 81         |
| 4.5.2 改进的决策树级联结构实验 .....                    | 82         |
| 4.5.3 本书方法的多姿态人脸检测速度与性能验证 .....             | 84         |
| 4.6 本章小结 .....                              | 86         |
| <b>第 5 章 基于组件距离匹配度函数的部分遮挡人脸检测 .....</b>     | <b>88</b>  |
| 5.1 引言 .....                                | 88         |
| 5.2 部分遮挡人脸检测算法的总体描述 .....                   | 89         |
| 5.3 基于 SA-AdaBoostSVM 算法的各组件检测 .....        | 91         |
| 5.4 基于组件匹配度函数的组件整合验证算法 .....                | 92         |
| 5.4.1 组件距离匹配度函数及相关概念定义 .....                | 92         |
| 5.4.2 组件整合分组算法 .....                        | 93         |
| 5.4.3 组件验证算法 .....                          | 94         |
| 5.4.4 遮挡组件估计与人脸定位检测 .....                   | 95         |
| 5.5 实验结果与分析 .....                           | 96         |
| 5.6 本章小结 .....                              | 99         |
| <b>第 6 章 总结与展望 .....</b>                    | <b>100</b> |
| <b>参考文献 .....</b>                           | <b>102</b> |
| <b>作者发表的相关学术论文 .....</b>                    | <b>116</b> |

## 第1章

# 人脸检测技术综述

### ◆ 1.1 人脸检测技术研究的目的和意义 ◆

随着社会的不断发展与科技的不断进步,人脸信息处理的研究已经成为当前的研究热点之一,是生物特征识别、视频监控、人机交互、安防、内容检索以及电视会议等领域的研究基础,对上述领域的发展起到非常重要的作用<sup>[1-8]</sup>。人脸检测是人脸信息处理中的一个关键环节,是自动人脸识别的前提和基础,人脸检测性能的好坏,直接影响着人脸信息处理的结果<sup>[9,10]</sup>。

人脸检测(Face Detection)是指基于一定的算法或策略对任意的输入图像或图像序列进行一定的搜索遍历,从而判断其中是否包含人脸,如果包含人脸,则定位出每个人脸的位置、大小以及姿态<sup>[11,12]</sup>。自从20世纪六七十年代,人们便开始利用计算机进行人脸检测与识别的研究,经过几十年的不断发展已经逐渐成熟,成为计算机视觉领域中的研究热点<sup>[13-16]</sup>。人脸检测问题的研究最早是来自于人脸识别问题的,起初的人脸识别问题的研究往往假设人脸位置已经获得或很容易获得,主要针对的是无背景图像或背景图像非常简单的人脸图像,因此人脸检测问题并未受到充分的重视。然而,在实际应用中,人脸图像的背景往往是非常复杂的,上述的假设很难满足实际应用系统的需求。为了使人脸识别系统能够得到广泛的应用,就必须首先从实际的复杂背景中检测和定位出人脸。因此,人们开始进行了复杂背景下的实时

人脸检测研究。从此,人脸检测开始逐渐受到广大研究工作者的重视,并逐渐发展为模式识别与计算机视觉领域一个独立的研究课题<sup>[17-20]</sup>。

此外,由于人脸是一种具有弹性的非刚性目标,容易产生局部的变形,与刚性目标的检测与识别相比,其处理更加复杂和困难。如果能很好地解决人脸检测问题,一般物体的检测问题也就很容易解决了。因此,人脸检测的研究对于大量同类问题的解决有着相互启发和相互推动的现实意义。

## ◆ 1.2 国内外研究现状 ◆

早在 20 世纪六七十年代,一些学者就展开了人脸检测与识别的相关研究。但是,最初的人脸检测研究只是简单地采用一些启发式技术,存在着自身难以解决的局限性,导致研究工作一度陷入低迷。20 世纪 90 年代,机器学习领域的不断发展,使得一些算法得到了理论上的突破,对人脸检测与识别的研究起到了很大的推动作用。加之,计算机硬件的迅速发展,使得运算能力不断提高,为脸检测与识别的实际应用提供了必要的保证。上述两个因素使得人脸检测与识别的研究成为当前的热门课题之一。

目前,从事人脸检测问题研究的国外机构主要有美国卡耐基梅隆大学、美国麻省理工学院、美国马里兰大学、德国 Muenster 大学、英国剑桥大学等;国内机构有中国科学院计算机技术研究所和自动化研究所、清华大学、北京工业大学等。一些机构还建立了公共的人脸库图像(如 MIT-CBCL 人脸库、CUM-PIE 人脸库等),对人脸检测的算法进行测试比较,以验证算法的检测效果。自开展相关研究以来,人脸检测研究中涌现出了许多种成熟的算法,一些颇具影响力的国际期刊和会议也都开设了人脸检测研究的相关栏目,每年都发表大量关于人脸检测的论文。

## 1.2.1 人脸检测方法分类及评价指标

### 1.2.1.1 人脸检测方法分类

对图像或者图像序列进行人脸检测的方法大致可以分为四类：基于知识规则的方法、基于不变特征的方法、基于模板匹配的方法以及基于统计模型的方法<sup>[21-23]</sup>。

#### (1) 基于知识规则的方法

基于知识规则的方法是利用人脸规则对输入图像进行人脸检测的方法。这类方法主要是利用一些简单的规则来描述人脸面部特征以及这些特征之间的关系。规则主要是来自于研究者对人脸一些固有特征及其相互关系的认识以及对人脸的先验知识的掌握。在人脸检测时，首先在输入图像中提取出人脸的面部特征，然后再通过验证这些特征之间的关系是否符合先验的规则来判断是否为人脸。Yang等<sup>[24]</sup>提出了基于马赛克图进行人脸检测的方法，该方法先是把人脸面部划分为若干个马赛克块，再利用一些先验的知识规则对这些检测出来的马赛克块进行验证，以判断其是否为人脸。文献[25]利用人工神经网络分别对人脸的眼睛、鼻子和嘴等器官进行检测，然后将这些器官的特征以及它们之间的关系传送到人工神经网络中，通过已有的知识规则确定其是否为人脸。

该类方法的优点是对于简单背景下的正面人脸图像可以取得较好的检测效果。其缺点是很难将人脸的先验知识转换为明确定义的规则，如果制定的规则过于严格时，通常会把一些人脸错误地判断为非人脸；倘若规则过于宽松，则将非人脸误判为人脸的可能性就会明显增大。另外，由于人脸模式复杂多变，很难列举出所有可能的人脸模式，因此很难将这类方法推广到多姿态人脸检测中。

#### (2) 基于不变特征的方法

基于不变特征的方法主要是通过寻找人脸面部不变的特征来对输入图像进行人脸检测。该类方法认为人脸面部的一些特征（肤色、边缘、纹理等）具有在不同的姿态、视角、表情下都不会发生改变的特性。故此，可以利用一些特定的方法对这些不变特征进行提取，并对提取出来的特征建模，以描

述特征之间的关系,进而实现人脸的定位与检测。Sirohey<sup>[26]</sup>通过使用人脸边缘信息和椭圆拟合的方法,从复杂的背景中分割定位出人脸区域。Miao等<sup>[27]</sup>从输入图像中提取面部器官水平方向的马赛克边缘,将各段边缘的“重心”与“重心”模板进行匹配,再通过灰度和边缘特征进行验证以实现人脸的检测。文献[28]提出了一种通过计算人脸面部的二阶统计纹理特征信息来进行人脸的检测与识别。一些研究者认为肤色是人脸检测中一种有效的特征,因此可以利用肤色特征信息进行人脸的定位与检测<sup>[29]</sup>。在实际应用中,通常采用联合几种不同特征的方法进行人脸检测<sup>[30,31]</sup>。如文献[32]首先利用肤色和形状大小等全局特征寻找到人脸候选区域,再根据眼睛、鼻子和头发等局部特征来确认候选区域是否为人脸。

该类方法的优点是对人脸姿态、表情、旋转变化都不敏感,在特定的环境下检测的性能和速度都较高。其存在的问题是:算法对图像质量要求较高;而且,人脸面部特征很容易受到光照、遮挡、阴影和其他噪声的影响,使得该类方法的有效性受到一定的影响。

### (3) 基于模板匹配的方法

基于模板匹配的方法是将人脸的面部特征用一个标准的人脸模板来描述,进行人脸检测的时候,先是计算输入图像子窗口与标准人脸模板之间的相关值,然后再将求得的相关值与事先设定的阈值进行比较,以判别输入图像中是否存在人脸<sup>[33-35]</sup>。标准的人脸模板是人工预先制定或是通过函数的参数化定义的模板。文献[36]给出了一种基于多关联模板匹配的人脸检测方法,该方法中的模板由一系列关联的双眼模板和人脸模板组成,这些模板是由单一平均脸模板根据伸缩和旋转变换产生出来的。在人脸检测时,首先使用双眼模板对所有可能尺度、形状和姿态的图像窗口进行搜索得到候选人脸,再用人脸模板进行进一步匹配筛选,最后通过启发式规则验证是否为人脸。

基于模板匹配的方法较为直观,但是由于人脸模式在姿态、表情和尺度上都存在很大的变化,所以固定模板很难适应这些变化。可变形模板虽然对人脸模式的变化具有较好的适应性,但是可变形模板的选择及参数的确定都是非常难以解决的问题。

### (4) 基于统计模型的方法

基于统计模型的方法是一种自下而上的方法。此类方法无需事先对输入

图像进行一些相关的处理,无需预先进行人脸标准模板的提取,它是通过采用一定的策略或方法对大量样本集进行学习和训练得到一个分类器,该分类器能够较为准确地识别出输入模式是人脸或非人脸,利用该分类器可以判断输入图像中是否包含人脸,从而实现对输入图像进行人脸检测<sup>[37-40]</sup>。在训练样本集时,可以采用不同的分类器,如主成分分析方法(Principal Component Analysis, PCA)、支持向量机方法(Support Vector Machine, SVM)、人工神经网络方法(Artificial Neural Networks, ANN)、AdaBoost方法等。该类方法的主要问题是获得具有较强代表性的大量样本集(特别是非人脸样本集)来对人脸检测分类器进行训练。

虽然该方法在训练分类器时需要较长的训练时间,同时需要大量具有代表性的人脸样本和非人脸样本,但是其可以通过机器学习算法取得较好的人脸检测性能。近年来,涌现出来的许多人脸检测算法都属于统计模型方法。基于统计模型的方法越来越受人脸检测研究工作者的青睐和重视,为此,在1.2.2中将进一步介绍该类方法中的一些经典算法。

#### 1.2.1.2 人脸检测算法的评价指标

研究工作者在评价各个人脸检测算法的检测效果时,一般都是在公共的标准人脸库上考察算法的以下三个指标。

##### (1) 检测率(Detection Rate)

检测率为算法正确检测出来的人脸模式数和实际具有的人脸模式总数的比值。这个比值体现了算法对人脸模式的识别能力,其值越高,表明算法识别人脸模式的能力越强。

##### (2) 误报数(False Alarms)

算法将非人脸模式错误地检测成人脸模式的数目,该指标也是很重要的,它体现了算法对非人脸模式的排除能力。一个算法的误报数越低,表明该算法排除非人脸的能力越强。

在评价一个算法的检测性能时,要同时考虑上述的两个指标,这两个指标通常用ROC曲线图的形式给出。单独考虑检测率是没有意义的,因为即使算法具有非常高的检测率,但它的误报数很多也是没有任何实用价值的。

##### (3) 检测速度(Detecting Speed)

速度体现了算法的效率,也是一个必须考虑的关键问题。在评价人脸检测算法检测性能的同时,还要关注算法的检测速度,使算法具有一定的实时

性,以满足实际应用的需求。

## 1.2.2 经典人脸检测算法

本节主要对人脸检测技术研究中几种较为经典的算法,即基于肤色分割的人脸检测、基于线性子空间的人脸检测、基于贝叶斯估计的人脸检测、基于人工神经网络的人脸检测、基于支持向量机的人脸检测以及近年来较为流行的基于 AdaBoost 算法的人脸检测进行简单介绍。

### 1.2.2.1 基于肤色分割的人脸检测

肤色是人脸的显著特征之一,其不依赖于人脸面部的细节特征,与大多数背景存在差异,且具有相对的稳定性,对表情和姿态的变化不敏感,故可以通过肤色分割来对输入图像进行人脸检测。在基于肤色分割的人脸检测算法提出之前,一些学者就对肤色分割技术做了相关的研究<sup>[41-43]</sup>。肤色分割技术主要涉及色彩空间的选择、肤色模型的构建和肤色分割阈值的确定等一些关键技术。色彩空间的选择对肤色的聚类范围和分割效果起到非常重要的作用。目前,在肤色分割中常用的色彩空间有 RGB, 标准化 rgb, HSV, YUV, YCbCr 和 YCgCr 等。肤色模型主要是通过对大量肤色像素集进行统计分析而得到的,它体现了输入的某一像素颜色与肤色的相似程度。高斯模型能够较好地描述出肤色的聚类分布,是较为常用的一种肤色模型。由于光照变化的影响,使得肤色分割阈值的选择成为一个难题。为了克服光照变化对分割效果的影响,相关的文献给出了动态地确定分割阈值的方法,以增强算法的适用性<sup>[44]</sup>。利用肤色分割通常只能快速排除图像中大量的非人脸区域,对于检测出来的肤色区域还需要进行进一步的验证,以确定其是否为人脸区域。

文献[45]利用肤色像素的连通性分割出肤色区域,然后根据肤色区域椭圆长短轴的比率判断其是否为人脸。文献[46]通过计算肤色似然度,利用逐步扩展局部最大值的方法来获得肤色区域,并采用模板匹配的方法对得到的肤色区域进行进一步的验证,以确定其是否为人脸。Yang 等<sup>[47]</sup>依据肤色像素的聚类特性,先将肤色区域逐步划分到特定的椭圆区域,然后再通过已有的先验知识和规则对椭圆区域进行验证,进而判断其是否为人脸。

Wu 等<sup>[48,49]</sup>同时建立了肤色模型和发色模型,并建立了几种不同的“肤色-发色”模板,同时给出了各模板对应的隶属度函数及模糊匹配规则的定义,最终通过对输入图像进行不同尺寸的扫描匹配来实现人脸检测。Hsu<sup>[50,51]</sup>提出一种复杂背景下的基于肤色模型的人脸检测算法,该算法性能稳定,对尺寸、姿态等变化不敏感,有效地解决了彩色图像中的人脸检测问题。文献[52-54]将肤色分割方法与统计模型方法相结合进行人脸检测,既提高了人脸检测速度,又保证了检测精度。

### 1.2.2.2 基于线性子空间的人脸检测

基于线性子空间的方法是找到一个线性子空间来表征人脸模式的集合。该方法是把输入模式投影变换到线性子空间,然后根据该输入模式在该子空间中的分布特性来判断其属于“人脸”还是“非人脸”。

主成分分析(PCA)是一种常用的线性子空间方法<sup>[55]</sup>。该方法通过对输入模式集合进行正交投影变换,将模式向量各分量之间的相关性去除掉,从而得到一组特征值顺次递减的特征向量。每个单独的人脸都可以近似地用正交变换得到的特征向量的线性组合来表示,即特征脸。文献[56]分别给出了人脸向量投影到主成分空间 $F$ 及其补空间 $\bar{F}$ 相对应的距离度量,在对输入图像进行人脸检测时,要同时考虑这两个距离度量才能获得较好的检测性能。文献[57]将尺寸为 $19 \times 19$ 的人脸样本和非人脸样本按行列顺序展开,对展开后得到的模式向量进行主成分分析,并在子空间中使用聚类的方式构建“人脸”簇以及“非人脸”簇,然后根据各样本到各个簇中心的距离来训练多层感知器,最终实现人脸的检测。

除了主成分分析方法外,因子分解方法(Factor Analysis, FA)以及Fisher准则方法(Fisher Linear Discriminant, FLD)也属于线性子空间方法。文献[58]在混合的线性子空间中对人脸检测的样本集构建模型,然后分别利用基于FA方法和FLD方法构造的人脸检测器对输入图像进行扫描检测。

### 1.2.2.3 基于贝叶斯估计的人脸检测

基于贝叶斯估计的方法是一种基于概率模型的方法,其采用贝叶斯分类器进行人脸检测,可以实现在不同的分辨率下对人脸模式的局部特征及其位置的联合概率密度进行较好的估计<sup>[59]</sup>。该方法的思想是通过计算输入图像子窗口 image 属于人脸模式 object 的后验概率 $P(\text{object} | \text{image})$ ,来判别输

人的图像子窗口是否为人脸。文献[60, 61]给出一种基于贝叶斯估计的人脸检测方法, 这一方法基于贝叶斯估计把计算后验概率的问题变换为一个求解似然度的问题, 把难以估计的先验概率  $P(\text{object})$  和  $P(\text{non-object})$  用一个比值的形式来代替。如式(1-1)所示, 当似然度(不等式左边的表达式)大于  $P(\text{non-object})$  与  $P(\text{object})$  的比值(不等式右边的表达式)时, 则认为当前的输入图像子窗口为人脸, 否则认为是非人脸。

$$\frac{P(\text{image} | \text{object})}{P(\text{image} | \text{non-object})} > \frac{P(\text{non-object})}{P(\text{object})} \quad (1-1)$$

贝叶斯估计方法的优势是当  $P(\text{image} | \text{object})$  和  $P(\text{image} | \text{non-object})$  精确时, 贝叶斯决策是相对理想的。Schneiderman 等还将贝叶斯估计的方法应用到多姿态的人脸检测中, 并通过多分辨率信息复用和由粗到精的搜索策略来提高人脸检测速度。

#### 1.2.2.4 基于人工神经网络的人脸检测

人工神经网络方法是把复杂的、难以显式描述的人脸模式的统计特性隐含在人工神经网络的结构和参数之中, 对于人脸检测来说具有一定的优势。Rowley 等<sup>[62]</sup>给出一种基于人工神经网络的人脸检测方法, 该方法中的人工神经网络是一个三层前向网络结构: 其输入层包含 400 个单元, 对应尺寸为  $20 \times 20$  的输入图像子窗口; 其隐层包含 26 个节点单元, 分别与输入层单元相连接, 这些节点被划分为对应于不同的人脸图像区域的若干组; 其输出层输出值的范围为  $[-1, 1]$ , 根据这个输出值来判断输入的图像子窗口是否为人脸。在该方法中, Rowley 等还通过一些启发式技术解决了人脸检测中的重叠问题。

随后, Rowley 等<sup>[63]</sup>又提出了使用多个人工神经网络来解决多姿态的人脸检测问题, 该方法包含两类人工神经网络: 一种是“Router Network”: 该神经网络假设输入子窗口中包含人脸, 任务是估计输入子窗口中人脸的方向; 另一种是“Detector Network”: 任务是将输入子窗口的方向逆旋转到正面垂直方向, 然后检测其中是否包含人脸。两类神经网络的结合使用, 体现了算法解决多姿态人脸检测的有效性, 使得该方法在庞大的测试集上在较低误报数的情况下取得了 79.6% 的检测率。

#### 1.2.2.5 基于支持向量机的人脸检测

支持向量机(SVM)是一种基于统计学习理论的模式识别方法, 最早由

Vapnik 等<sup>[64]</sup>提出,主要用于解决分类和回归问题。它的基本思想是对于非线性可分样本,将其输入向量经非线性变换映射到一个高维特征空间中,在变换后的空间中寻找一个最优的分类超平面。支持向量机基于结构风险最小化原理 (Structural Risk Minimization Principle, SRM)<sup>[65]</sup>,而人工神经网络基于经验风险最小化原理 (Empirical Risk Minimization Principle, ERM),所以基于支持向量机的人脸检测方法比人工神经网络方法具有更好的泛化能力。

Osuna 等<sup>[66]</sup>最早将支持向量机应用于人脸检测,该方法利用支持向量机对每个尺寸为  $19 \times 19$  的图像子窗口进行分类判别,以实现“人脸”与“非人脸”的检测。针对支持向量机训练时需要求解计算复杂度极高的二次规划问题,Platt<sup>[67]</sup>提出了所谓的序列最小优化方法 (Sequential Minimal Optimization, SMO),该方法将一个大型的 SVM 二次规划问题转化为一系列小型的子问题,这些小型子问题可以实现解析求解,而不必采用数值方法。SMO 有效地解决了 SVM 训练困难的问题,已成为 SVM 最常用的训练算法。

#### 1.2.2.6 基于 AdaBoost 算法的人脸检测

Freund 等在 1996 年提出一种自适应的 Boosting 算法,称为 AdaBoost 算法。该算法通过重新分配样本的权重,在一个弱分类器集合的基础上整合成一个强分类器,从而达到提高识别率的目的<sup>[68]</sup>。Viola 和 Jones<sup>[69,70]</sup>首次将 AdaBoost 算法用于人脸检测,实现了人脸检测速度与性能的全面提升。由于同时存在着性能和速度优势,使得 AdaBoost 算法成为近年来的一种主流的人脸检测算法。该方法通过积分图像可以非常方便、快速地计算出输入图像的大量 Haar-like 特征,然后再利用 AdaBoost 算法选择其中少数具有较强分类能力的 Haar-like 特征,并构造出这些特征对应的弱分类器,最后通过加权求和把这些弱分类器整合成一个分类能力更强的强分类器。Viola 的算法在人脸检测取得成功后,很多学者对此进行了相关的研究与探索,以进一步提高人脸检测的精度和速度。

上述几种经典人脸检测算法的评价指标如表 1.1 所示。由于 AdaBoost 算法在人脸检测中同时存在检测性能和速度的优势,所以本书阐述的内容主要建立在基于 AdaBoost 算法进行人脸检测的基础上,在后面的内容中将对 AdaBoost 算法进行详细论述与研究,故此,在这里不做详述。