

红外人脸识别技术

伍世虔 韦礼珍 方志军

(江西财经大学信息管理学院,南昌 330013)

摘要 研发一个稳定可靠的人脸识别系统至今还是计算机视觉中的一个难题,用红外图像来进行人脸识别是近几年才发展的一个新领域。本文对红外人脸识别技术,特别是特征提取的研究,进行了综述,并对未来红外人脸识别的方向进行了展望。

关键词 人脸识别 红外图像 特征提取

中图分类号:TP319.4 **文献标识码**:A **文章编号**:1006-8961(2008)12-2260-10

Infrared Face Recognition Technology: A Survey

WU Shi-qian, WEI Li-zhen, FANG Zhi-jun

(School of Information Technology, Jiangxi University of Finance & Economics, Nanchang 330013)

Abstract Developing a reliable face recognition system has been a challenge problem. Infrared appears to be a good alternative imagery as it is independent of external illumination. In this paper we present a survey on Infrared human face recognition, especially on feature extraction. Several major issues for further research are also addressed in this paper.

Keywords Face recognition, infrared images, feature extraction

1 引言

随着社会的发展,人们越来越迫切要求快速而准确的身份验证和识别系统。而生物特征所具有的人类内在的特征和差异,使得基于生物识别方法具有很强的鲁棒性和重复性,成为身份验证的主要手段。人脸识别技术,由于具有直观性、被动性和非侵犯性,是当今生物识别技术中最为活跃的一个领域。

近十多年来,来自数学,计算机,心理学,乃至认知科学方面的研究人员都在努力探索能使计算机自动识别人脸的理论 and 算法,并产生了一批人脸识别系统。这一工作主要基于可见光照相机。其道理不言而喻:大量照片都由这类相机产生,且这种相机便宜、可靠、分辨率高。但是,到目前为止,还没有一个

系统可以稳定可靠地应用于实际中。其性能受到光照、阴影、化妆等一系列外部因素的影响。另一方面,脸是3维的弹性物体,它随姿态、表情、发型等变化而变化,而所有这些变化都难以建模、描述和分析。2002年在美国海军部、反毒品局及标准局的主持下举行的人脸识别产品竞赛(FRVT2002)结果表明^[1]:对于像Visionics公司开发的FaceIt等10个全球最著名的产品,如果在严格控制的环境下,且被测对象也给予一定的配合,则效果还是满意的(正确率>95%)。否则性能会急剧下降到识别率只有30%~50%。2000年,美国移民和归化局曾在与墨西哥的边境上布置人脸识别系统以监视非法偷渡者。结果该系统运行一个星期后就被拆除。美国也曾曾在迈阿密的Palm Beach机场、波士顿的Logan机场、佛罗里达的Tampa大街等地方装置人脸识别系统作为反恐工具,效果也不尽人意。究其原因,就在

基金项目:国家自然科学基金项目(60665001);江西省自然科学基金项目(0611025)

收稿日期:2006-12-20;**改回日期**:2007-06-07

第一作者简介:伍世虔(1964~),男,教授,博士生导师。主要研究方向为生物识别、图像处理与分析、模糊逻辑及神经网络。

E-mail:shiqian.wu@gmail.com

于研究人员还无法回答“人脸识别基于什么”,“在变化的人脸中什么是独特的、不变的”等根本问题。至今,人脸识别仍是计算机视觉,模式识别领域最具挑战性的问题。为此,美国国防部高级研究计划署(DARPA)提出了一个庞大的研究项目— Human identification at a distance (HID),参与单位 26 家,几乎包括全美国最著名的大学(如 MIT、斯坦福大学等)和公司(如 SAIC、Honeywell、Visionics 等)。2006 年举行的人脸识别产品竞赛中,由于采用 3 维人脸模型以及高分辨率图像,较之 2002 年的结果,识别性能得到很大提高^[2],但是光照问题还是不能完全克服。

文献[3]~[7]对国内外人脸识别的发展做了详细的综述。在我国,中国科学院和清华大学等单位对人脸识别进行了广泛而深入的研究,如人脸建模、人脸检测、姿态判定、人脸图像合成、特征提取、分类器设计等,取得了国际人脸认证竞赛(FAT2004)第一名的骄人成绩,研发了一批高性能的人脸识别系统,如清华大学的人脸综合系统、TH-FAS人脸分析系统,以及中国科学院的“中科奥森”人脸识别系统^[8]等,使我国的人脸识别技术处于世界先进水平。人脸识别的关键是在复杂的背景中检测出人脸来进行识别,虽然已经提出大量的算法来解决这些问题,但仍然不能满足识别的要求,其中,光照成为可见光人脸识别的最大障碍。如何克服这些问题?相关研究人员开始尝试用红外人脸图像来进行识别,HID 的一个子项目就是基于红外图像的人脸识别技术研究^[9]。

红外人脸图像的识别分为近红外(波长为 0.7~1.0 μm)人脸识别和远红外(波长为 8~1 000 μm)人脸识别。近红外人脸识别是通过在照相机上安装一个近红外发光二极管来保证有足够强烈和稳定的光照在人的脸上,然后,照相机使用一个长波通滤波片,该滤波片允许近红外光通过,但过滤掉可见光,从而达到减少环境光照,得到一张清晰的人脸正面图像。虽然使用近红外人脸图像来识别确实可以很大程度上减少环境光照对获取的人脸照片的影响,而且达到很好的识别性能^[8,10,11],但是有一个致命的缺点,就是需要测试者的配合,而且二极管的发光也让人有点不自在。人脸识别的优点之一就是具有被动性,而这一点在近红外人脸识别中没有体现。其实,近红外人脸识别也是通过照相机获取人脸反射的光,从这一点上讲,近红外人脸识别同

可见光人脸识别是一样的,所以,如果测试者在用近红外拍照的时候,脸部没有正对着照相机,照出来的图像还是有阴影存在的。与近红外人脸图像不同,远红外是通过获取人脸发出的热辐射来成像的,本文重点讨论的就是远红外(以下简称红外)人脸图像的识别。

由于红外图像是基于目标的温度而成像,因而又称为温谱图(thermogram)。它完全不受外部光照的影响,也就不存在阴影的问题,因此,红外人脸识别系统可实现全天候识别。一般认为人是恒温动物,其温度均值和方差很稳定^[12];其次,人的皮肤在中波红外(MWIR,波长 1.4~6 μm)和长波红外(LWIR,波长 6~14 μm)这两个波段能吸收大量的入射能量,也就是说,人脸皮肤在此波段范围内具有很高的发射率。通过实验测量,人体皮肤在 MWIR 波段的发射率至少为 0.91,而在 LWIR 波段的发射率至少为 0.97,可近似认为是黑体(发射率为 1),且发射率不受种族、肤色的影响,这就是说,种族和肤色对红外人脸识别没有影响,而且在所拍摄的人脸图像中,当人体温度与环境温度接近时,人脸部分总是最亮的,这为人脸图像的分割带来了很大的便利^[13]。

用红外来进行人脸识别这一设想是美国 Mikos 公司的 Prokoski 于 1992 年最早提出^[12]。除红外人脸图像的上述特点外,Prokoski 更进一步指出^[12,14,15]:人脸温谱图正是由人脸组织与结构如血管大小和血管分布等的红外热辐射决定的,而每个人的血管分布是独特的,不可复制的,且这种特性不随年龄的增长而变化,所以它们如同指纹一样与人的生理结构有关,具有唯一性。在当时,因为红外照相机价格高昂且受到管制而没有得到重视。

随着大量红外技术由军用转为民用,特别是 20 世纪 90 年代 CCD 技术的发展,极大地促进了非制冷式红外相机的发展。如今,红外相机的价格由原来的每台 20 万美元左右下降到现在的 2~3 万美元,且这种趋势还在进一步发展。因而,近几年来,美国、日本、以色列、新加坡及我国等少数几个国家相继开展了红外人脸识别的研究。这些工作主要体现在如下几个方面:(1)红外人脸数据库的建立^[9];(2)红外图像用于人脸识别的可行性论证及性能分析^[16-26];(3)温谱图的分析^[17,20-22,27,28]。如 Eqninox 公司建立了相同条件下的红外与普通图像数据库,在此基础上对 2 组数据库运用相同的算法,

以比较其识别率,其测试结果表明^[20],在光照变化较大的情况下:(1)对同一张脸在相同的变化条件下,红外图像的变化要比普通图像的变化要小;(2)不管用哪种方法,比如:主成分分析法(PCA),线性判别分析法(LDA),局部特征分析法(LFA),及独立分量分析法(ICA)等,红外图像的识别率均高于普通图像。文献[17]、[25]、[26]的结果表明,红外人脸识别的性能受姿态、表情变化的影响较可见光小。这些研究表明,用红外进行人脸识别是有效的生物识别方式。

通过对红外人脸图像的分析及其识别性能的理论 and 实验研究,与可见光人脸识别方法相比,红外图像人脸识别的优点如下:

(1)红外人脸识别独立于光源,其识别性能对光照的变化所带来的影响很小,可以在光线很弱的地方或者全黑的夜间进行拍摄识别;

(2)红外人脸识别不易受伪装的影响,即使整容或化妆后也不能改变人脸面部的血管分布,从而不改变人脸热辐射模式;

(3)红外人脸图像不受肤色的影响,不像可见光人脸图像中黑人和白人的灰度值差距那么大;

(4)红外人脸识别受人脸表情变化和姿态的影响小。在可见光中,即使在光照不变的情况下,人脸表情发生改变也会导致脸部的很大改变,从而影响识别性能。

正是由于上述优点,推动了红外人脸识别技术的兴起和发展。

虽然红外图像具有一些可见光图像无法媲美的优点,但也存在自身的不足:

(1)红外图像分辨率低 人脸边缘轮廓和细节特征比较模糊,没有可见光那么清晰;

(2)红外线对玻璃的透射性很差。戴眼镜的人的红外人脸图像的眼睛部位全部是黑色,由于没有眼睛部位的信息,所以会影响识别性能;

(3)同可见光人脸照片容易受到外部环境光照的影响一样,红外人脸图像容易受到外部环境温度的影响;

(4)除环境温度外,红外人脸图像还受到生理和心理的影响,如酒精反应、紧张、害羞、兴奋、疲倦、发烧、牙痛等,都会影响识别性能。

总的来说,红外人脸识别在全球范围内还只是刚刚开始。研究人员还只是用常规的方法应用于红外人脸图像。如何针对红外图像的特点,提出一种

新颖而且有效的方法来提取人脸的特征,仍是一个非常新颖而具有挑战性的课题。

2 红外人脸识别系统

人脸自动识别系统包括两个主要技术环节(图1):一是人脸的检测与定位,即从输入图像中找到人脸并且将人脸从背景中分割出来,二是对归一化的图像进行特征提取与识别^[25]。

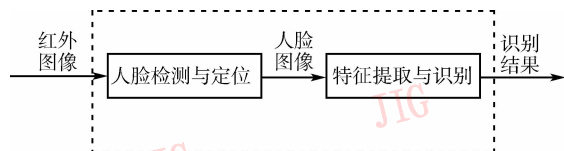


图1 人脸自动识别系统

Fig.1 Automatic face recognition system

目前国际上还没有统一的红外人脸数据库。常用的数据库是美国HID课题组采集的红外人脸数据库和美国圣母大学红外人脸数据库。

3 红外人脸检测方法

人脸检测就是找出给定图像中所有包含人脸的区域。可见光的人脸检测方法主要使用局部特征检测方法,比如检测眼睛位置。但这类方法在红外人脸检测中的效果不是很好,因为红外人脸图像相对于可见光图像来说比较模糊。由于人的皮肤具有很高的发射率,且发射率不受种族、肤色的影响,因而,在红外人脸识别中,常采用基于全局特征的方法来检测人脸^[25,26]。

4 红外人脸特征提取与识别方法

作为识别的基础和关键的一步,就是要提取出被识别对象的固有特征。如果能提取出每个人脸的独特特征,识别就可以很简单(如特征匹配的方法),否则就很困难,识别的重点只能放在分类器设计上。人脸识别之所以难,就在于人脸是个时变对象。直到今天,研究人员还无法回答“在变化的人脸中什么是独特的、不变的或至少是稳定的”等根本问题。综合现有文献,研究人员根据红外人脸图像的特点,结合人体生理学、生物传热学、模式识别等知识,提出了如下特征提取和识别方法。

4.1 等温线匹配方法

可见光人脸图像和红外人脸图像中都存在等高线(灰度值相等的点组成的线),在可见光中,等高线反映的是人脸的光照信息和一些人脸表面的结构信息,这些等高线受光线影响特别大,一般不具备很好的识别信息,所以不能用于人脸识别。而这些等高线在红外人脸图像中反映的是人脸皮肤下面的血管分布信息^[12,14]。使用噪声等效温差(NETD)小于或等于 0.7°C 的红外照相机所拍摄的人脸照片,每张脸一般含有 100 个或者更多的封闭的等温线^[12,14],这些等温线的形状对于每个人来说都是独一无二的,即使是相似的双胞胎也是不同的,因为这些等温线是由脸皮下面复杂的血管和动脉网络产生的^[12]。用等温线作为特征来识别通常有两类方法。

(1)等温线形状实时匹配 主要有 3 种方法用于提取等温线特征^[12,14]:用包含该特征的区域的标准模板进行提取;用几何分析的方法来分析等温线形状,分析的结果和脸部图像的质心即为所求的特征;用数学上的分形方法来表示等温线。Prokoski 使用等温线实时匹配的方法,用于门禁系统识别(需要配合),准确率可以达到 96%。

(2)等温线形状的置后匹配 一是采用形状匹配,分析面部温度图像数据库中所有的形状,使用特征形状来比较形状的特征:周长,面积,质心在 x 和 y 轴的位置,面积/周长等等。每个人的图像用 11 个系数多项式来刻画,在特征空间中任何两个图像的差异都要计算,从而确定适当的阈值来得出匹配或不匹配的结果。这种方法对非合作的识别有很高的准确率,但是计算很复杂,需要较长的时间。应用于实时识别系统时还要依赖于硬件性能的提高。二是采用度量匹配,即抽取出人脸的几何特征点进行距离匹配。在清楚的可见光人脸图像中大概只有十个特征点(如外眼角、内眼角、耳朵同头部相连的最上面和最下面两个点、鼻孔的中心等)可以比较稳定地提取出来。而红外人脸图像除了眼睛、鼻子、嘴巴等脸部特征外,还可以从血管分布中(比如分叉点)提取信息,这是可见光所没有的。然而,不管是对可见光图像还是红外图像,特征点的提取受到图像分割精度的影响,特别是人脸姿态和尺度对距离度量的影响。所以脸部度量不是一个很鲁棒的识别方法^[26]。

4.2 基于生理学结构的方法

这种思想就是运用图像分割方法从红外人脸图中找出脸部血管的细节(minutiae)^[15]或称为

血管网络(vascular network)^[16]。文献[12]、[14]由此提出两种方法:

(1)对称波形 对称波形的提出基于一个假设,即每个人的不对称性都是唯一的,对称波形正是把这个不对称的唯一性用于识别。该方法首先对红外人脸图像进行大小和灰度值归一化。为了减少人的头部旋转的影响,对称波形方法只分析两个外眼角之间的部分,所以只有当红外人脸图像中两只眼睛都能看到的时候,对称波形方法才能使用。有几种方法可以用来分析对称波形,其中有代表性的有:方法一:找出两外眼角之间的小块矩形区域,对该区域的每一行,找出一点,使得该点左右两边像素的灰度值之和的差最小。找出每一行的灰度值的中点,从上到下连接,所得到的折线就是要找的对称波形。方法二:分析等温线同水平线的交点,找到两个交点的中点。方法三:把图像进行二值化,然后找到每一行的中点;方法四:找到细节对称的点。对称波形方法可以用来判断人的头部的旋转、倾斜,从而可以得到人的正脸。对于小型的数据库,这几种方法都可以找出唯一的对称波形,但是对于大的数据库,这个方法就不大适用,但可以考虑用于分类。

(2)面部编码 如果能从每个人脸中提取唯一的面部编码,就可以直接识别而不需要同数据库中每个人脸进行匹配比较。在观察每个人的对称波形差异度的基础上,可以考虑采用编码方法,该方法从对称波形中提取 1 维的条形码。从对称波形到条形码的转换看似很容易,其实不然,转换过程需要复杂的计算。在 1 维条形码之后也可以尝试 2 维的条形码,其方法是先建立一个数据库,该数据库中,人脸被分割成很多小单元,对每个小单元进行编码。当对一张人脸图像进行识别的时候,先对该人脸进行分割,对分割的每一块都同数据库中的内容进行比较,找出最匹配的一块,然后用数据库中该块的编码赋给它,这样就组成了 2 维的条形码^[14]。这种方法看起来很有前途,但需要一个含有大量人脸图像的优化数据库。

文献[29]与 Prokoski 的上述思想是一致的,只是图像分割的手段(采用数学形态学)、对所提取特征的处理(分为局部特征和全局特征)及特征匹配的策略不同而已。

4.3 基于传统统计识别的方法

由于人脸图像的可变性,因而统计识别方法不仅在可见光也在红外人脸识别中得到广泛应

用^[17-20,24,25,27,28,30-32]。该方法将人脸图像作为随机向量,用统计的方法来抽取人脸的全局或局部特征。常用的方法有主成分分析(PCA)法、线性判别分析(LDA)法、独立主元分析(ICA)法、局部特征分析(LFA)法等。文献[20]根据自制的照相机对同一对象同时采集到可见光人脸图像和红外人脸图像,并运用 PCA、LDA、LFA 及 ICA 4 种方法分别针对可见光人脸图像和红外人脸图像识别做了比较,部分结果如图 2 及表 1 所示。

表 1 基于可见光和红外的识别性能比较^[20]

Tab.1 Recognition on visible and infrared modalities

	可见光	红外	误差减少
	平均/最小/最大	平均/最小/最大	平均/最小/最大
PCA	0.73/0.36/0.97	0.95/0.89/1.00	83/83/100
LDAg	0.93/0.85/0.99	0.97/0.92/1.00	57/47/100
LDA _t	0.92/0.76/1.00	0.98/0.94/1.00	77/74/0
LFA _e	0.82/0.62/0.97	0.93/0.84/0.99	61/59/92
LFA _b	0.85/0.63/0.98	0.93/0.83/0.99	47/53/73
ICA	0.88/0.72/0.99	0.94/0.86/1.00	49/50/100

注:LDA_g:变换矩阵由所有样本数确定

LDA_t:变换矩阵由训练样本+部分测试样本确定

LFA_e:变换矩阵由线性回归方法得到

LFA_b:变换矩阵由最小相关准则得到

值得指出的是,该实验数据来自同时段,即训练图像和测试图像为同一时段采集或采集的时间相隔很短。这种情况下,可以认为训练和测试图像来自完全相同的环境条件。实验结果表明,对于同时段数据,红外识别的性能要优于可见光人脸识别。然而,文献[24]、[28]的结果却显示这两种光源的识别结果差别不大。

文献[27]、[28]对不同时段(或称为时延)数据,即训练样本和测试图像不是同一时段采集的,进行了测试,时间间隔可以为几个星期、几个月甚至 1 年。表 2 所示为文献[28]采用 PCA 方法识别时所得到的一个实验结果。经分析,得到如下的结论:

(1)对同时段数据,基于可见光或红外的人脸图像的识别性能差不多;

(2)对不同时段数据,无论是用可见光还是红外人脸图像,识别性能都会下降;

(3)用 PCA 方法对不同时段数据识别时,基于可见光的识别性能优于红外图像,且时延间隔越长,差别越明显。这说明,红外人脸图像随环境条件、人的心理和生理的变化而变化很大。Socolinsky 等人对不同时段红外图像识别得到更好的结果^[21,22],同时,但他们认为文献[27]、[28]的性能下降主要应归因于 PCA 方法,同时,他们也承认,红外人脸图像的变化却是不争的事实。正如 Wilder 教授指出^[24],对红外人脸图像,环境温度的影响本质上来讲等同于外部光线对可见光图像的影响。因此基于温谱图的方法来识别人脸也是不可靠的^[33]。

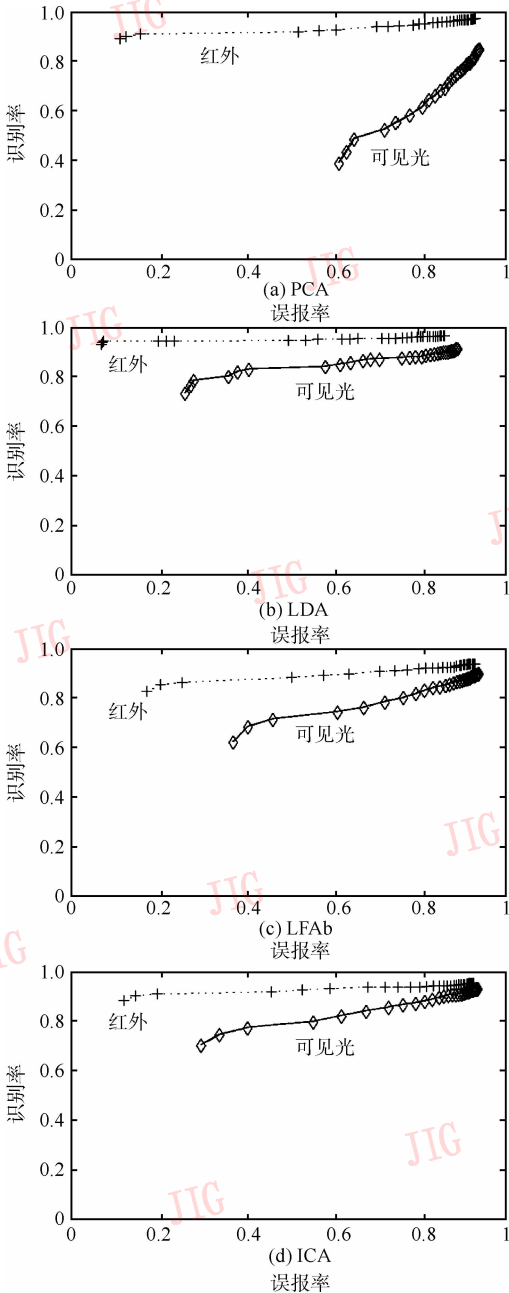


图 2 接受者操作特性曲线^[20]

Fig.2 Receiver-operating-characteristic curves

表 2 可见光(下)和红外(上)的正确识别率
Tab.2 Time-lapse recognition in visible light
(bottom) and IR (top)

	FA LM	FA LF	FB LM	FB LF
FA LM	0.67	0.65	0.62	0.57
	0.90	0.91	0.71	0.71
FA LF	0.68	0.69	0.60	0.62
	0.91	0.92	0.74	0.72
FB LM	0.64	0.67	0.65	0.69
	0.75	0.81	0.86	0.84
FB LF	0.63	0.62	0.63	0.65
	0.74	0.78	0.88	0.89

注:LF:左右各一灯;LM:左中右各一灯

FA:中性表情;FB:微笑表情

4.4 其他特征提取/识别方法

文献[26]提出用神经网络对红外人脸图像进行识别。为提高识别性能,红外图像进行了均衡化处理,归一化的图像的温度分布信息(灰度直方图)、局部平均温度信息以及人脸形状信息分别作为神经网络的输入参数进行分类,然后把分类结果进行融合。实验结果表明,当环境温度变化不大时,基于正面图像的识别率可达到 97% 以上。但是,由于该方法的灰度值进行了均衡化处理,改变了灰度直方图的最初形状,带来了一些失真;当人脸的姿态变化较大,或环境温度变化较大时,效果会大大下降。文献[23]提出了一种统计假设约减的方法,其思想是采用低水平模型和高水平模型相结合的方法。首先用低水平模型得到一组原始红外图像的相似度高的候选部分,然后再运用高水平模型对这些候选部分进一步测试,并得到最终识别结果。低水平模型运算速度快但结果不是非常好,而高水平模型准确性高但运算代价高,所以两者结合可以达到速度与识别准确性的平衡。文献[34]根据小波理论,将 1 幅图进行适当级数的小波包分解,得到 1 棵小波包分解树,选取其中识别率最高的若干个节点进行傅里叶变换,得到每个节点的特征矩阵,并以此来表示图的特征。文献[35]结合小波理论和离散余弦变换(DCT),先对人脸图像进行两级小波分解,再对低频子带进行分块并对每个子块进行 DCT 变换,提取部分变换后的系数作为子块的特征向量。实验结果证明,同基于传统 PCA、DCT 以及 DWT(离散小波变换)+PCA 等方法相比,这两种方法更好

地提取了红外人脸图像的判别信息,得到了很好的识别效果。与文献[23]类似,文献[16]也把识别过程分成两步,首先用模糊连通分割方法把人脸从背景中分割出来,然后用 Gabor 滤波器对分割出来的脸部图像进行滤波处理,再利用两个参数的 Bessel 函数对滤波后的图像进行建模,并以此模型做初步分类,得到可能性高的候选对象,最后利用贝叶斯分类器找到准确的匹配。这种方法只获取表面温度信息,并未能得到皮肤内部的特征,因而对环境等因素的影响也不具有鲁棒性。

4.5 基于血流图方法

为提高红外人脸识别系统在时延环境下的识别性能,文献[33]基于人体的皮肤温度分布和温度调节机理,结合红外成像原理及生物传热学知识提出了一个人脸的血流模型,该模型的作用就是把易受外部环境影响的温度信息(温谱图)转为人体的生理信息,比如血流的运动参数。而人体的血液循环信息相对来说是稳定的,不受外部环境影响的,可以基于这些特定的生物信息来识别不同的人。

该模型的提出基于以下假设:

- (1) 只考虑皮肤表面的热交换;
- (2) 测试对象处于一个稳定的热平衡状态,因此将人体内部的温度看作是一个常量,同时不考虑人体的热调节功能(如出汗);
- (3) 周围环境温度比人体温度低;
- (4) 不考虑非正常的生理(像发烧,头痛,发炎等)和心理状态(像焦虑,害羞等)因素;
- (5) 红外相机已校准,能够精确测量温度;

在这些假设下,皮肤表面可用以下热量平衡公式来描述

$$Q_r + Q_e + Q_f = Q_c + Q_m + Q_b \quad (1)$$

Q 表示单位面积的热流量。下标 r, e 和 f 分别表示辐射、蒸发和对流,左边 3 项代表从皮肤表面到外界的流出热流量。下标 c, m 和 b 表示人体热传导、新陈代谢和血液对流,这些是从人体体内到皮肤表面的流入热流量。

根据式(1),并基于生物热力学,可得到下面的血流计算公式^[33]:

$$w = \frac{es(T_s^4 - T_e^4) + Amd^{3M-1}Pgb/n^2(T_s - T_e)^{M+1}}{ac(T_a - T_s)} - \frac{k(T_c - T_s)}{D} + H \quad (2)$$

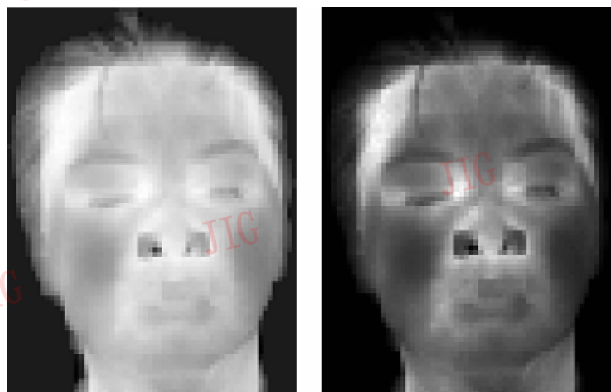
式中各参数的含义及取值详见表 3 所示。

本质上来说,等式(2)提供了一种基于点运算的变换,从而可以把一幅温谱图转换为血流图。这一变换既保持了被测对象的位置信息,同时也保持了被测对象的几何信息而没有产生扭曲变形。图 3 所示为温谱图及其对应的血流图。值得指出的是,该变换是单调的,保证了温度高的部位具有大的血流量。从图像处理的角度来看,该变换提高了图像的动态范围;从模式识别的角度来看,这个变换是非线性的,对温度低的部分,加权很小,而温度高的部分则加权很大。因而,对温度较低且变化的背景和头发部分,在血流数据中就受到抑制,从而减轻了环境温度的影响。表 4~5 所示为分别对同时段的图像和时延的图像基于温谱图和血流图的识别结果。

表 3 式(2)变量说明

Tab. 3 Nomenclature

符号	含义	取值
w	血流量	
s	Stefan-Boltzmann 常数	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
e	皮肤热辐射系数	0.98
T_s	实际皮肤温度	
T_e	实际环境温度	
T_a	动脉温度	312.15K
T_c	体内温度	312.15K
k	皮肤热传导系数	$0.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
m	空气热传导系数	$0.024 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
c	血比热	$3.78 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
h	单位面积新陈代谢热量	4.186 W m^{-2}
α	皮肤逆流交换比	0.8
P	Prandtl 常数	0.72
ν	空气动力粘度系数	$1.56 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
β	空气热膨胀系数	$3.354 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
g	重力加速度	$9.8 \text{ m}^2/\text{s}$
A	无量纲常数	0.27
M	无量纲常数	0.25
d	人脸特征长度	0.095
D	人脸半径	0.095



(a)温谱图

(b)对应的血流图

图 3 温谱图与对应的血流图

Fig. 3 Thermal face and corresponding blood perfusion face

表 4 同时段图像基于温谱图和血流图识别结果

Tab. 4 Recognition results based on thermal face and blood perfusion face of same session data

周围 环境	测试样 本数	数据 类型	正确识别 的图像数	识别率 (%)
空调环境 25.6 ~ 26.3℃	707	温度	543	76.8
		血流	637	90.1

表 5 不同时段图像基于温谱图和血流图识别结果

Tab. 5 Recognition results based on thermal face and blood perfusion face of time laps data

周围 环境	测试样 本数	数据 类型	正确识别 的图像数	识别率 (%)
空调环境 24.8 ~ 26.8℃	1 003	温度	245	24.43
		血流	867	86.44

对于同时段数据,与训练样本相比,可以认为环境条件、发型、生理和心理特征是几乎不变的,且人脸分割误差很小。测试数据与训练模板的差别主要来自于人脸表情和姿势的改变;被测对象允许戴眼镜;因为相机不能自动聚焦导致的图像质量的影响。表 4 的结果显示,血流数据对人脸变化的敏感度低于温度数据,眼镜对同时段数据识别率的影响也很小。

对不同时段图像,测试数据包含一系列的变化,如周围环境温度、人脸形态(特别是发型、姿势)和生理(例如,早上人是放松的,下午和晚上是疲劳的)。发型的影响会导致人脸归一化的不一致。表 5 的实验结果显示,与同时段图像识别结果相比,对于时延数据,基于血流图的识别率变化

不大,但是,基于温谱图的性能却显著降低。进一步的分析发现,影响基于温谱图的性能的一个至关重要的因素来源于生理。实验结果显示,在相同的环境温度下,当人过度疲劳的时候收集的人脸温谱图根本无法识别,而生理因素对识别率的影响是因人而异的。

图 4 为不同条件下进行的 4 次测试的结果。测试 1 为同时段数据的识别结果;测试 2 为环境温度基本不变情况下(有空调),在不同时段(3 个月期间)内搜集测试样本的识别结果;测试 3 为环境温度基本不变情况下(有空调),采集戴上眼镜的不同时段(3 个月期间)的测试样本的识别结果;测试 4 为环境温度有很大变化(无空调)环境下,在 3 个月期间的时延数据的识别结果。实验结果表明,对戴上眼镜后的时延数据,识别性能会进一步下降;在非空调环境下,温谱图的识别率只有 13.2%,而在这些变化条件下,基于血流图的人脸识别性能基本保持不变,所以血流图很大程度上减小了外部环境给红外人脸图像引起的变化,大大提高了时延数据的识别率。

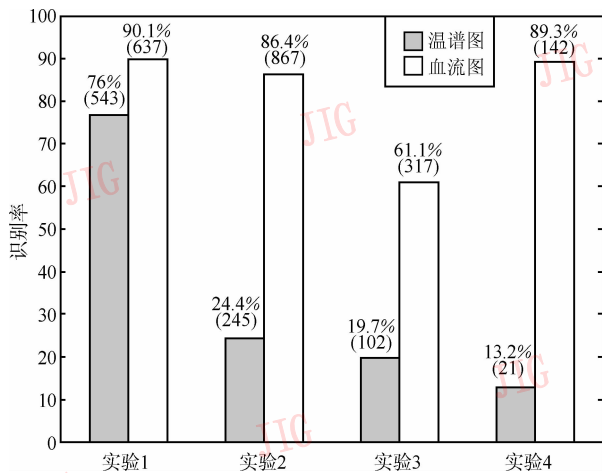


图 4 不同情况下,基于温谱图和血流图的识别结果

Fig. 4 Recognition rates with thermograms / blood perfusion data in different conditions

5 结 语

红外图像由于不受光照影响、不存在阴影问题,而且更多地反映了人脸自身的信息(温度分布),为提取人脸的稳定特征,对识别率的提高有正面影响。应指出的是,Prokoski 的论述“人是恒温动物,其温度均值和方差很稳定”,其实是有前

提的,即相同的环境条件。所谓“人是恒温动物”,准确地说是指人体内部而不是外部(即皮肤)。实际上,每个人的皮肤表面温度时时刻刻都在变化,而这个变化不是线性的^[36,37]。因此,基于等温线的方法是不准确的。

人体生理学知识^[36]告诉我们,脸部上表皮的血管只有 10 ~ 15 μm ,而血管处的温度仅比其邻近区域的温度高 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。就目前的红外照相机,其分辨率还没有高到能捕捉到如此细微的差别,因此基于图像分割方法,从红外人脸图中找出脸部血管网络是不可靠的。

从硬件出发,开发高精度红外相机以得到清晰、稳定的血管网络,这是目前的研究方向之一。例如 Sony 公司就研发出一种红外相机^[38],它能拍到皮肤下的毛细血管并用于人脸识别。然而,更多的研究还是从算法上来提高红外人脸识别的性能。

把融合技术运用到生物识别领域,形成多生物特征相结合(如人脸 + 指纹)、多成像源相结合(如可见光 + 红外^[30-32, 39-41])的生物识别系统是今后的重要发展方向之一。目前,融合技术在红外人脸识别中主要反映在如下 3 个层次:

(1) 图像(或数据)级融合 这类系统同时得到一个人脸的可见光图像和红外图像,然后利用融合技术合成一幅近似不随光线变化的图像^[30,32,39,41]。显然,这类系统的识别率大大高于可见光人脸识别系统;

(2) 特征级融合 即针对红外人脸图像,用不同的方法来抽取人脸特征,如小波脸、频谱脸、特征脸等^[34,35]。文献[26]则分别提取红外人脸的温度信息和几何信息,通过神经网络融合这两种信息。实验结果显示,不同的方法(角度)可以提取人脸不同方面的特征,基于特征的融合方法也是很有有效的;

(3) 决策级融合 即不同特征(或基于同一幅红外人脸图像,如文献[26],或不同光源,如红外 + 可见光^[27,28,31,39,41]通过分类器分别得到各自不同的分类结果(分数),而最终的决策由这些分数加权融合决定。这类融合方法相对来说容易实现而且有效,所以在多形式(多传感器)生物识别系统中得到广泛应用。文献[27]的实验结果显示,对时延图像,如果分别采用红外或可见光图像识别,识别率分别为 74% 和 75%,如果结合红外和可见光图像,采用决策级融合技术,则识别率可提高到 91%。

最后要指出的是,上述血流模型(即式(2))的建立基于5个假设,其中之一就是稳定热场假设,即认为人体体内温度保持不变,代谢热也是常数,因此,血流量是稳定不变的,也就是说上述血流模型没有考虑到生理和心理因素对血流量的影响,是一个静态模型。文献[42]提出了一种基于动态血流模型的方法,从变化的人脸温谱图中提取人脸血流数据和状态信息;根据所辨识的状态信息,对血流数据做进一步的补偿和归一化处理,以得到鲁棒、独特的红外人脸生物(血流)特征,达到非常态下也具有鲁棒的识别性能,这也是一种非常新颖的方法。

参考文献 (References)

- Bone M, Blackburn D. Face Recognition at a Chokepoint-Scenario Evaluation Results [EB/OL]. http://www.dodcounterdrug.com/facialrecognition/DLs/ChokePoint_Results.pdf, 2002-11-14.
- Phillips P J, Scruggs W T, O'Toole A J, *et al.* FRVT 2006 and ICE 2006 Large-Scale Results [EB/OL]. www.frvt.org/FRVT2006, 2007-05-19.
- Chellappa R, Wilson C L, Sirohey S. Human and machine recognition of faces: a survey [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1995, **83**(5): 705 ~ 740.
- Zhao W, Chellappa R, Rosenfeld A, *et al.* Face recognition: a literature survey [J]. *ACM Computing Surveys*, 2003, **35**(4): 399 ~ 458.
- Liu Xiang-dong, Chen Zhao-qian. Research on several key problems in face recognition [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2004, **41**(7): 1074 ~ 1080. [刘向东, 陈兆乾. 人脸识别技术的研究. *计算机研究与发展*, 2004, **41**(7), 1074 ~ 1080.]
- Ai Hai-zhou, Xiao Xi-pan, Xu Guang-you. Face detection and retrieval [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2003, **26**(7): 874 ~ 881. [艾海舟, 肖习攀, 徐光祐. 人脸检测与检索 [J]. *计算机学报*, 2003, **26**(7): 874 ~ 881.]
- Xu Lin, Yuan Bao-zong, Gao Wen. Development and prospect on realistic facial modeling [J]. *Journal of Software*, 2003, **14**(4): 804 ~ 810. [徐琳, 袁保宗, 高文. 真实感人脸建模研究的进展与展望. *软件学报*, 2003, **14**(4): 804 ~ 810.]
- Li S Z, His face team. AuthenMetric F1: A Highly Accurate and Fast Face Recognition System [EB/OL]. http://research.microsoft.com/icc2005/Demos_schedule.htm, 2005-10-21.
- Equinox Corp. Human Identification at a Distance (HID) [EB/OL]. <http://www.equinoxsensors.com/products/HID.html>.
- Li S Z, Zhang L, Liao S C, *et al.* A near-infrared image based face recognition system [A]. In: *Proceedings of the 7th International Conference Automatic Face & Gesture Recognition* [C], Southampton, UK, 2006: 455 ~ 460.
- Li S Z, Chu R, Liao S C, *et al.* Illumination invariant face recognition using near-infrared images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2007, **29**(4): 627 ~ 639.
- Prokoski F J, Coffin J S, Riedel R B. Method for Identifying Individuals from Analysis of Elemental Shapes Derived from Biosensor Data [P]. US Patent: 5163094, 1992-11-10.
- Kong S G, Heo J, Abidi B R, *et al.* Recent advances in visual and infrared face recognition—a review [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2005, **97**(1): 103 ~ 135.
- Prokoski F J. History, current status, and future of infrared identification [A]. In: *Proceedings of IEEE Workshop on Computer Vision beyond Visible Spectrum: Methods and Applications* [C], Hilton Head, SC, USA, 2000: 5 ~ 14.
- Prokoski F J. Method and Apparatus for Recognizing and Classifying Individuals Based on Minutiae [P]. US Patent: 6173068B1, 2001-01-09.
- Buddharaju P, Pavlidis I, Kakadiaris I A. Face recognition in the thermal infrared spectrum [A]. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop* [C], Washington DC, USA, 2004: 133 ~ 133.
- Friedrich G, Yeshurun Y. Seeing people in the dark: face recognition in infrared images [A]. In: *Proceedings of the 2th International Workshop on Biologically Motivated Computer Vision* [C], Tubingen, Germany, 2002: 348 ~ 359.
- Li Jiang. Research on Face Recognition Approaches of Infrared Images [D]. chaugsha: National University of Defense Technology, 2005. [李江. 红外图像人脸识别方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.]
- Pereira D C. Face Recognition Using Infrared Imaging [D]. Monterey, CA, USA: Naval Postgraduate School, 2002.
- Socolinsky D A, Selinger A. A comparative analysis of face recognition performance with visible and thermal infrared imagery [A]. In: *Proceedings of International Conference on Pattern Recognition* [C], Quebec, Canada, 2002: 217 ~ 222.
- Socolinsky D A, Selinger A. Thermal face recognition in an operational scenario [A]. In: *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* [C], Washington DC, USA, 2004: 1012 ~ 1019.
- Socolinsky D A, Selinger A. Thermal face recognition over time [A]. In: *Proceedings of International Conference on Pattern Recognition* [C], Cambridge, UK, 2004: 187 ~ 190.
- Srivastava A, Liu X. Statistical hypothesis pruning for identifying faces from infrared images [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, **21**(7): 651 ~ 661.
- Wilder J, Phillips P J, Jiang C, *et al.* Comparison of visible and infrared imagery for face recognition [A]. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition* [C], Killington, Vermont, USA, 1996: 182 ~ 187.
- Wu S Q, Jiang L J, Cheng L, *et al.* RIFARS: a real-time infrared face recognition system [A]. In: *Proceedings of Asian Biometrics Workshop* [C], Singapore, 2003: 1 ~ 6.
- Yoshitomi Y, Miyaura T, Tomita S, *et al.* Face identification using thermal image processing [A]. In: *Proceedings of IEEE International*

- Workshop of Robot and Human Communication [C], Sendai, Japan, 1997;374 ~ 379.
- 27 Chen X, Flynn P J, Bowyer K W. Visible-light and infrared face recognition [A]. In: Proceedings of Workshop on Multimodal User Authentication [C], Santa Barbara, CA, USA, 2003; 48 ~ 55.
- 28 Chen X, Flynn P J, Bowyer K W. IR and visible light face recognition [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2005, **99**(3): 332 ~ 358.
- 29 Buddhharaju P, Pavlidis I, Tsiamyrtzis P. Physiology-based face recognition using the vascular network extracted from thermal facial images: a novel approach [A]. In: Proceedings of IEEE Advanced Video and Signal Based Surveillance [C], Lake Como, Italy, 2005; 354 ~ 359.
- 30 Hariharan H, Koschan A, Abidi B, *et al.* Fusion of visible and infrared images using empirical mode decomposition to improve face recognition [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Atlanta, GA, USA, 2006; 2049 ~ 2052.
- 31 Kim S-K, Lee H, Yu S, *et al.* Fusion of visual and infrared images for face recognition [A]. In: Proceedings International Joint Conference of SICE-ICASE [C], Busan, Korea, 2006; 3945 ~ 3949.
- 32 Kong S G, Heo J, Abidi M A. Multiscale fusion of visible and thermal IR images for illumination-invariant face recognition [J]. International Journal of Computer Vision, 2007, **71** (2): 215 ~ 233.
- 33 Wu S Q, Song W, Jiang L J, *et al.* Infrared face recognition by using blood perfusion data [A]. In: Proceedings of Audio- and Video-based Biometric Person Authentication [C], Rye Brook, NY, USA, 2005; 320 ~ 328.
- 34 Wei Li-zhen, Wu Shi-qian, Fang Zhi-jun, *et al.* Infrared face recognition based on wavelet packet transform and Fourier transform [J]. Journal of Computer Research and Development, 2007, **44**(2): 257 ~ 261. [韦礼珍, 伍世虔, 方志军等. 基于血流图和小波包域傅里叶变换的红外人脸识别方法 [J]. 计算机研究与发展, 2007, **44**(2), 257 ~ 261].
- 35 Wu S Q, Wei L Z, Fang Z J, *et al.* Infrared face recognition based on blood perfusion and sub-block DCT in wavelet domain [A]. In: Proceedings of 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition [C], Beijing, China, 2007; 1252 ~ 1256.
- 36 Guyton A C, Hall J E. Textbook of Medical Physiology [M]. 9th Edition, Philadelphia: W. B. Saunders Company, 1996.
- 37 Jones B F, Plassmann P. Digital infrared thermal imaging of human skin [J]. IEEE Engineering in Medicine Biology Magazine, 2002, **21**(6): 41 ~ 48.
- 38 Takiguchi K. Living-Tissue Pattern Detecting Method, Living-Tissue Pattern Detecting Device, Biometric Authentication Method, and Biometric Authentication Device [P]. US Patent: 200701163, 2007-03-24.
- 39 Bebis G, Gyaourova A, Singh S, *et al.* Face recognition by fusing thermal infrared and visible imagery [J]. Image and Vision Computing, 2006, **24**(7): 727 ~ 742.
- 40 Bowyer K W, Chang K I, Flynn P J, *et al.* Face recognition using 2D, 3D and infrared: is multimodal better than multisample? [J]. Proceedings of the IEEE, 2006, **94**(11): 2000 ~ 2012.
- 41 Singh S, George A G, Pavlidis I. Infrared and visible image fusion for face recognition [A]. In: Proceedings of SPIE Defense and Security Symposium (Biometric Technology for Human Identification) [C], Orlando, USA, 2004; 585 ~ 596.
- 42 Fujimasa I T, Chinzei T, Saito I. Converting far infrared image information to other physiological data [J]. IEEE Engineering in Medicine & Biology Magazine, 2000, **19**(3): 71 ~ 76.