

文章编号: 1002-1582(2012)02-0152-08

一种通用的红外人脸器官定位算法^{*}

张涛^{1,2}, 赵阳¹, 洪文学², 刘旭龙²

(1. 燕山大学 信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

(2. 燕山大学 生物医学工程研究所, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 红外人脸热像图是红外成像领域的研究热点之一, 而对作为其基础性研究的通用红外人脸定位算法却研究的较少。利用由人脸生理结构造成的温度特异性和由温度变化形成的图像边缘, 给出了一种通用的人脸器官定位算法。首先利用温度特异性定位鼻孔等温度特异性强的区域, 然后以此为参考点, 结合面部器官分布特点, 对融合提取的图像边缘信息进行眼睛等其他器官的定位。实验结果表明, 该方法对各器官的平均定位精度均达到了 90% 以上, 具有一定的实用价值。另外, 该方法不仅可以对常规的眼、鼻、口等器官进行定位, 而且还可以对眉骨、瞳孔等位置进行定位。

关 键 词: 红外热像; 人脸器官定位; 温度特异性; 边缘

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

A universal facial organs localization method for infrared face

ZHANG Tao^{1,2}, ZHAO Yang¹, HONG Wenxue², LIU Xulong²

(1. College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

(2. Institute of Biomedical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract: Infrared face is one of active areas in infrared imaging, but the facial organs localization as its basis issues is lack of research. A universal method is proposed which localizes facial organs based on temperature distribution specificity and edge formed by variety of temperature. In this method, the organ which lies in strongly temperature specify zones like nose is located first, and then takes it as reference to locate other organs combined with image edge information. The experiments show that the average precision achieves 90% at least, which means that the method can be used in applications. At the same time, this method not only can locate regular eyes, nose, mouth, but also can locate brow bone and iris. So it can be used in more applications.

Key words: infrared thermal image; facial organ localization; temperature specificity; edge

0 引 言

将机器视觉应用于红外热像处理是近年来红外领域的研究热点之一。传统上, 红外热像在工业领域得到了较好的应用。近年来, 随着生物识别技术

和医学技术与机器视觉和红外热像联系的日益紧密, 使得基于红外热像的人脸热像图分析在生物识别^[1]、人体指标检测^[2]和疾病诊断^[3]等各领域成为了研究热点。

红外图像是基于拍摄对象的表面温度成像, 因

* 收稿日期: 2011-07-15; 收到修改稿日期: 2011-11-28

E-mail: zhtao@ysu.edu.cn

基金项目: 国家中医药行业科研专项基金(200707022); 国家自然科学基金(60904100); 河北省自然科学基金(F2011203073)

作者简介: 张涛(1979-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事图像处理、可视化模式识别等方面的研究。

此只反映被拍摄对象的温度分布而完全不受光照等其他外部环境的影响。文献[4]指出,人是恒温动物,其温度均值和方差很稳定。人的皮肤在中波红外(波长 $1.4\sim6\mu\text{m}$) 和长波红外(波长 $6\sim14\mu\text{m}$) 这两个波段内具有很高的发射率,且与种族、肤色无关。因此在进行人脸识别时,利用红外热像具有天然的不受环境光照和面部伪装的优点^[1,5,6],可以达到在传统可见光学拍摄下人脸识别所无法达到的功能。

同时,从认知科学的角度来看,人类在感官形成时期对于温度的敏感性高于可见光敏感性,而人脸作为人类个体的典型标志物,对于由人脸红外热辐射和认知形成的研究也已经开始^[7]。从解剖学的角度来看,人脸的温度分布由人脸组织结构,如血管粗细、血管分布、神经元活动状况等红外热辐射决定。当人体局部出现某些病变时,患处的机体组织代谢、血液循环将会发生改变,引起温度变化,导致红外热辐射强度异常^[1,3]。因此,通过人脸的红外热像可以对如血压、血流变等生理指标进行测量^[2]和对诸如 Bell 面瘫这类面神经性疾病进行诊断^[3,8]。同时,由于红外图像可以反映局部的经络和穴位导通情况,因此可以为针灸治疗进行辅助选穴^[8]。

在以上的典型红外人脸面部热像分析中,都需要以人脸热像中的器官定位为基础。对于人脸识别,面部的器官定位可以更好地分析面部等温线的分布或血管网络的相对位置;对于人体指标测量,通过面部器官定位可以辅助进行面部重要血管定位,从而可以更为可靠地进行血压等指标的测量;对于面部神经性疾病诊断,通过器官定位可以精确地定位病变部位,为准确诊断提供进一步的依据;在穴位的选择过程中,由于中医穴位与面部器官位置紧密相关,因此面部器官定位是面部穴位定位的基础工作。

与可见光的人脸图像相比,红外人脸热像图反映的是温度变化,因此其数值变化范围较小。同时,各器官温度特征分布与可见光图像的光强分布相比不够明显,因此在已有的面部红外热像应用中,大多避开复杂的人脸定位过程而直接定位感兴趣的目标点。这类方法虽然具有对特定领域问题有一定的效果,但加大了相应算法的后期处理难度,且难以具有通用性。因此,对人脸热像图的器官定位成为了人脸热像图研究的基础性工作之一^[9,10]。文献[9]发现了人脸器官的温度奇异性变化,但单纯的 Harris 算子只适用于部分温度变化明显的器官,难以做到全部面部器官的定位;文献[10]利用灰度投影法对

器官进行定位,该方法虽然计算简单,但它受温度变化干扰较大,尤其对具有面部疾病的人脸检测会出现误判,从而影响其应用范围。

本文提出了综合温度特异性检测和边缘检测的面部器官定位方法。该方法综合利用了面部温度的相关性和温度的突变型,结合灰度投影法获得面部器官定位。在该方法中,不但可对常规的口、鼻、眼等器官进行定位,而且可完成对眉骨、瞳孔等非常规器官定位,具有更强的扩展性。

1 红外图像预处理

一般情况下,由红外热像仪采集到的红外面部图像存在干扰,因此需要对目标红外面部图像进行预处理。该处理主要包括目标头部区域分割和图像去噪。

即便是对相对理想情况下的图像采集,采集到的红外热像也会受到头发、衣服等因素的影响。同时,由于人体本身为热辐射源,当环境温度与人体温度存在温差时,必然在人体与环境之间存在温度过渡带。这些因素将对后期器官定位造成影响,因此需要对目标头部区域进行分割。文献[4]指出,人体温度相对恒定,其温度均值和方差稳定,根据这一特点,通过阈值选择将头部从背景中区分出来。

而对目标头部图像去噪的目标是在有效去除噪声的前提下,最大限度地保留图像边缘和细节,使图像的温度特异性和边缘能清晰显示,便于后续的特征提取。本文利用形态学方法进行去噪^[1],其预处理结果如图 1(b)所示。

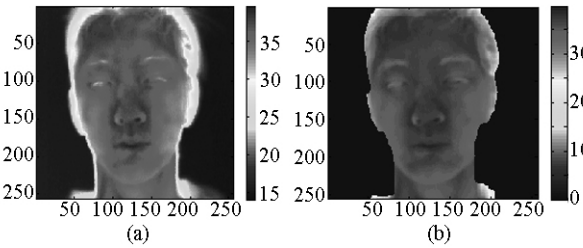


图 1 原始图像和预处理后的图像
(a)原始图像;(b)预处理后的图像。

由图 1 可以看到,经过预处理后的图像消除了由于人体热辐射造成的边缘温度影响,同时减轻了衣服和部分头发等因素的影响,为后期的定位奠定了良好的基础。

2 器官定位算法

2.1 温度特异性信息定位

由红外热像仪采集到的正面人脸红外图像如图 1 所示。由图可知,对于人脸的红外热像,大部分区

域温度变化平缓,且空间相关性较强。这主要是由于这些面部区域血管分布均匀造成的。但在器官部位,由于生理结构发生变化,因此出现了温度的特异性。例如:由于眉毛和头发因素的存在,阻碍了热量向外辐射,造成眉骨和头顶的温度降低。由于鼻翼部分组织较薄,因此与其他部位相比更接近环境温度。由于眼睛、鼻孔和嘴巴的结构特性,因此其温度也发生变化。这些变化与人类面部的生理特点相关,具有良好的泛化特性。

通过以上分析可知,在面部红外热像图中,温度的特异性可利用其温度分布的自相关特性进行分析。在面部器官分布位置,由于生理结构的变化,其自相关函数将发生变化。设红外热像图矩阵为 I ,其自相关函数为

$$E(x,y)=\sum_{u,v}[I(x+u,y+v)-I(x,y)]^2 \quad (1)$$

式中: $I(x,y)$ 表示坐标为 (x,y) 处的温度值; $E(x,y)$ 表征由于像素点 (x,y) 偏移 (u,v) 所造成的图像灰度的平均变化,因此矩阵 E 描述了局部图像灰度的变化程度。通过对 E 中极值的分析可以获取温度特异性部位空间信息。定位 $E(x,y)$ 中的局部极值通过对 E 求一阶曲率获得,根据 Harris 算法^[9],红外热像图 I 的自相关函数 $E(x,y)$ 中的局部极值为

$$J(x,y)=\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial^2 I(x,y)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 I(x,y)}{\partial y^2}\right)-\sqrt{\left(\frac{\partial^2 I(x,y)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 I(x,y)}{\partial y^2}\right)^2+4\left(\frac{\partial^2 I(x,y)}{\partial x\partial y}\right)^2}\right] \quad (2)$$

由矩阵 J 的物理意义可知,矩阵 J 即为图像 I 的温度特异性分布。在该矩阵中,某一点的值越大表明在图像 I 上该点温度自相关性越差,即特异性越强。对于图 1(b),其温度特异性分布如图 2 所示。由于温度特异性矩阵 J 的原始值分布范围较大,图 2 分别用原始值分布和对数运算后的温度特异性矩阵表示。由图可知,由于头像区域和背景经过分割,因此分割边缘处温度变化最大,造成温度特异性检验容易受到头部边缘信息干扰,由器官造成的温度特异性变化易被淹没。

为了去除头部边缘信息干扰,需要对由头部边缘造成的温度特异性进行滤除。滤除原理如式(3)所示。

$$\begin{aligned} J_m(x,y) &= J(x,y) \cap [f \Theta b(x,y)] \\ &= J(x,y) \cap (\max\{f(u+x,v+y)-b(u,v) \mid (u+x,v+y) \in G_f; \\ &\quad (u,v) \in G_b, f(u,v) = \text{sign}(I(u,v))\}) \end{aligned} \quad (3)$$

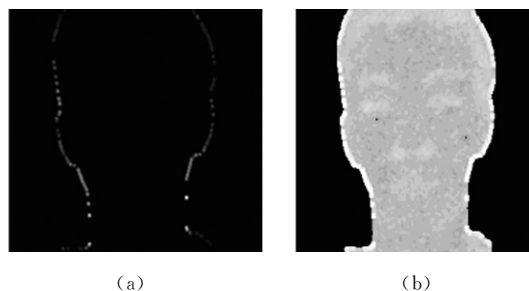


图 2 图 1 的温度特异性分布
(a) 原始分布; (b) 对数分布

$$\text{式中: } \text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \end{cases}; b = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; G_f \text{ 和}$$

G_b 分别表示矩阵 f 和 b 的定义域。

滤除后的温度分布与原分布相比,去除了原头像中的边缘部分,克服了由于边缘温度变化造成的特异性干扰,得到只包含面部特征的温度特异性分布图像。如图 2(a) 所示的采用模板滤除后的温度特异性图像如图 3 所示。

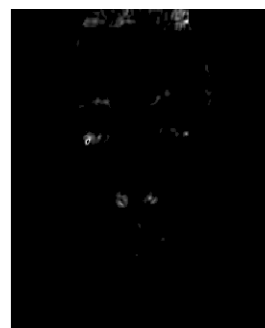


图 3 去除干扰后的温度特异性分布

由图 3 可以看到,经过对边缘信息的滤除,其特异性区域主要包括鼻孔、眼睛、眉毛和头发。其中鼻孔和眼睛为可靠识别目标,即每个被摄对象均会出现的器官,且特异性较强。依据器官的空间分布特性可知,鼻区大体位于面部的中间位置。依据温度特异性分布的物理含义和样本统计结果可知,鼻子周围的温度特异性较强,其值的分布范围在 15~150 之间。以此为约束条件对矩阵 J_m 进行约束,并强化保留区域,得到的图像如图 4(a) 所示。将鼻区特异性分别向水平方向和垂直方向做投影,投影曲线如图 4(b) 和图 4(c) 所示,根据鼻区温度特异性特点可知,投影曲线的最大值坐标即为鼻孔的水平和垂直位置。

得到鼻区的位置后,即可根据鼻孔的水平位置,将头像分为上下两层,鼻孔以上为眼部位置,鼻孔以下为嘴区域。同样,检测眼睛时只保留温度特异值为 14~80 的点,选取眼睛附近的温度特异点,其他位置置零,得到的眼部温度特异性如图 5(a) 所示。

将眼部特异性分别向水平方向和垂直方向做投影，投影曲线如图 5(b)和图 5(c)所示。由眼部特点可知，水平投影曲线最大值坐标即为瞳孔的水平位置，而在垂直投影中两个峰值各自的中值位置即为瞳孔的垂直位置。

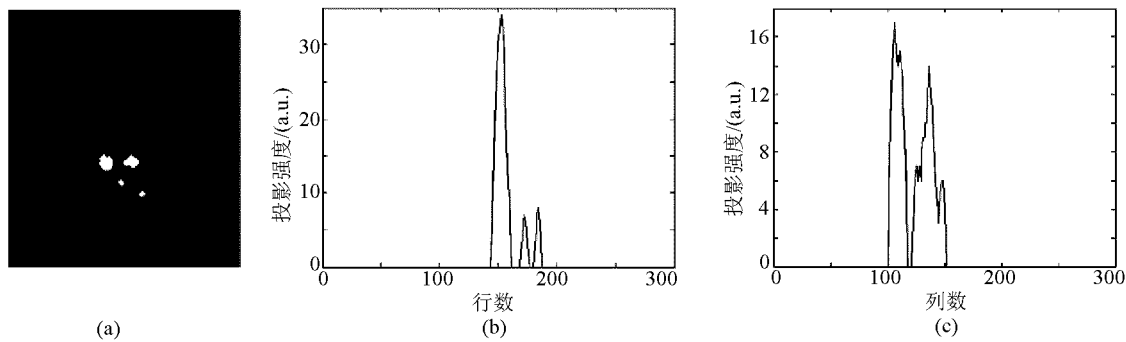


图 4 鼻区温度特异性和投影
(a) 鼻区的温度特异性;(b) 水平方向投影;(c) 垂直方向投影。

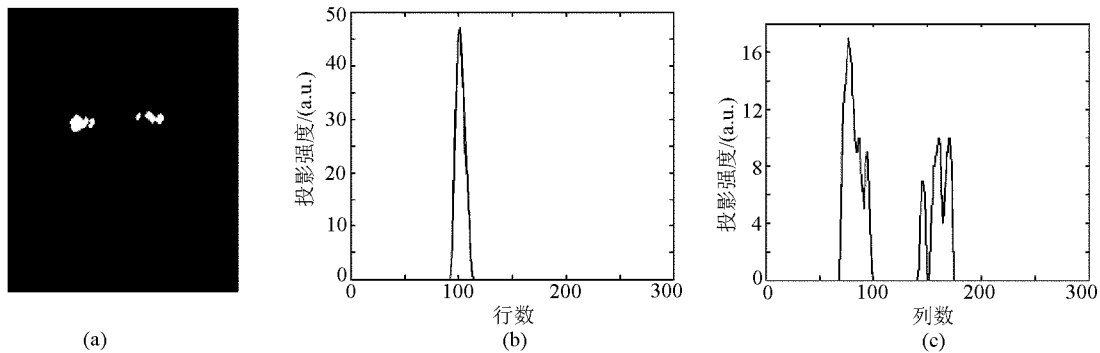


图 5 眼区温度特异性和投影
(a) 眼区的温度特异性;(b) 水平方向投影;(c) 垂直方向投影。

2.2 基于边缘信息的定位

温度特异性检测可以发现自相关变化剧烈的区域,但对于嘴和面颊位置而言,其温度自相关变化不明显,难以用温度特异性进行可靠定位。但由于嘴部等区域在温度上必然发生变化,可以采用针对温度变化的边缘检测处理。考虑到定位精度和运算量,本文采用 Log 算子来进行边缘检测。目标红外图像的边缘图像为

$$\begin{aligned} M(x,y) &= \nabla^2[G(x,y) * I(x,y)] \\ &= [\nabla^2 G(x,y)] * I(x,y) \end{aligned} \tag{4}$$

其中, $\nabla^2 G(x,y)$ 为 Log 算子:

$$\nabla^2 G(x,y) = \frac{1}{\pi\sigma^4} \left(\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2} - 1 \right) \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \tag{5}$$

式中的符号 * 为卷积运算符。对图 1 边缘提取的结果如图 6(a)所示。

Log 算子虽然在边缘能得到较好的提取效果,但所获得的干扰成分也比较多,比如头发、衣物等干扰。对其干扰成分进行滤除,如式(6)所示。

$$\begin{aligned} M_m(x,y) &= M(x,y) \cap [f \ominus b(x,y)] \\ &= M(x,y) \cap (\max\{f(u+x,v+y) - \end{aligned}$$

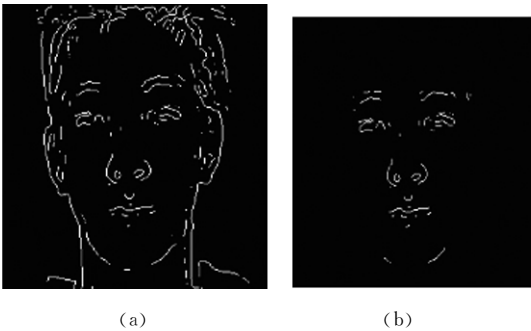


图 6 边缘提取结果
(a) 原始边缘图像;(b) 滤除干扰后的边缘图像。

$$\begin{aligned} b(u,v) \mid (u+x,v+y) \in G_f; \\ (u,v) \in G_b, f(u,v) = \text{sign}(I(u,v)) \} \} \end{aligned} \tag{6}$$

矩阵 M_m 是对边缘图像和头部模板的腐蚀结果继续与运算的结果,根据腐蚀深度可以去除大部分的干扰成分。图 6(a)的运算结果如图 6(b)所示。由于上一步已经确定了鼻区坐标和眼区坐标,设鼻区的中心坐标为 x_3 ,眼区的中心坐标为 x_2 ,则依据嘴部的生理特点,嘴部边缘的分布区域 x_4 为

$$x_4 - x_3 \leq x_3 - x_2 \tag{7}$$

整理得

$$x_4 \leq 2x_3 - x_2 \tag{8}$$

即嘴部区域的纵向坐标。对该区域的边缘图像进行水平投影,如图 7 所示。分析其特点可知,投影曲线的最大值坐标即为唇线的水平位置。同理可完成各部位横向坐标的定位。

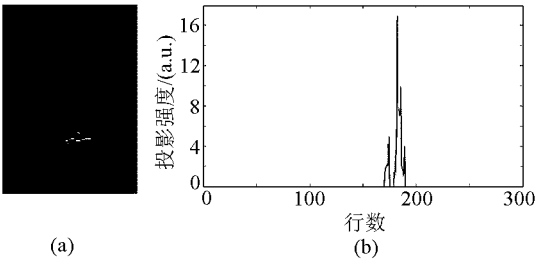


图 7 嘴部边缘和水平投影曲线
(a) 嘴部边缘;(b) 水平投影曲线。

2.3 温度差异与边缘综合定位

将温度特异性和边缘特征进行融合,可对更多部分进行定位。将二者进行融合,可得如图 8 所示的图像。由此可知,对于眼区以上部位,眉骨处温度将发生轻微变化,同时该部分在边缘检测中会出现一定的变化。将二者进行融合,可以对眉骨进行定位。同理可完成眼角等其他部位的定位。



图 8 温度特异性和边缘综合图

对图 1 器官定位的最终结果如图 9 所示。在该图中,对温度为 0℃ 的线进行了器官位置标注。其纵向线由左到右分别表示左眼外侧、左眼瞳孔、左眼内侧、鼻尖、右眼内侧、右眼瞳孔和右眼外侧。横向线由上到下分别表示眉骨、眼睛、鼻孔、嘴巴。通过这些关键点的定位,可以完成对面部任意区域的定位。

3 实 验

3.1 数据来源

为了验证算法的有效性,本课题组针对人脸面部的红外热像图初步建立了面部红外热像数据库。热像采集所选用的红外热像仪是北京市光电子技术研究所生产的 WP-95 型医用红外热像仪。该红外热像仪采集的温度分辨率为 0.05℃,空间分辨率为

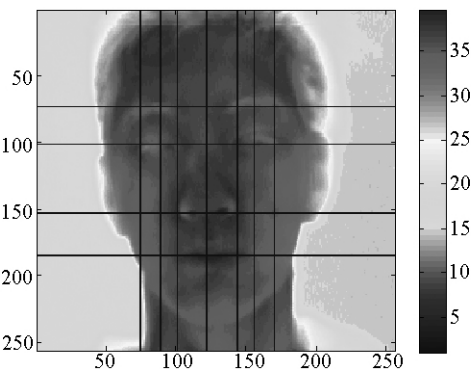


图 9 正面和侧面面部特征坐标轴

1.5 mrad。所采集的红外热像分辨率为 256 × 256pixels,符合本次实验的要求。

在拍摄对象的选择上,本次实验共选择拍摄对象 65 人。其中男性 34 人,占总人数的 52.31%,女性 31 人,占总人数的 47.69%。拍摄对象年龄在 16 ~ 65 岁之间,平均年龄 39 岁。从拍摄对象的选择上来看,拍摄对象照顾了不同年龄和性别的分布,具有普遍意义。

由于本文采用的温度特异性算法和边缘提取算法均与温度分布相关,因此根据拍摄对象的面部温度特征的不同,将拍摄到的红外热像图分为温差正常、温差较大、温差较小三个类别,其数量分布如表 1 所示。造成温差变化的原因可能是拍摄对象自身的,如一些面部神经性疾病,也可能是受环境影响,如刚从寒冷的室外进入室内。环境因素在诸如疾病诊断等特定场合下可以避免,而对于人脸识别等应用却难以避免。对于生理因素造成的变化,则无法从根本上避免。因此在拍摄对象的选择上,选取了部分面部神经疾病病人参加拍摄,以保证实验结果的可泛化能力。

表 1 不同温度分布热像统计

类别	温差范围/℃	数目	比例/%
温差正常	[3,8]	46	70.77
温差较大	(8, 15)	6	9.23
温差较小	(0, 3)	13	20.00

3.2 实验结果与分析

在本文中,对数据库中所有的热像图进行了定位。在实验过程中,根据温差变化分为温差正常、温差较大、温差较小三个类别进行测试,最终给出总的测试结果。在定位器官上,所选择的部分分为眼区、鼻区和嘴区三个定位常用的面部器官。其中,眼区定位包括眉骨、瞳孔和双眼各自的内外侧坐标;鼻区定位包括鼻尖和鼻孔;嘴区定位包括嘴巴位置的分布。根据定位线的方向,实验结果如表 2 和表 3 所

示。

表 2 纵向定位线精度

定位部位	温差正常组/%	温差较大组/%	温差较小组/%	精度/%
左眼外侧	97.83	83.33	92.31	95.38
左眼瞳孔	100.00	100.00	92.31	98.46
左眼内侧	95.65	66.67	92.31	92.31
鼻尖	97.83	100.00	100.00	98.46
右眼内侧	93.48	83.33	92.31	92.31
右眼瞳孔	100.00	83.33	100.00	98.46
右眼外侧	93.48	83.33	100.00	93.85

由表 2 可知,综合来看,对各器官关键点的定位精度均达到了 90%以上,且出现了较为明显的左右对称趋势。由于瞳孔和鼻尖位置由温度特异性决定,而温度特异性由人脸的生理结构形成,受到的干扰因素较少,因此定位精度较高。而眼睛的内侧和

外侧位置由边缘和温度特异性共同构成,温度特异性表现并不明显,若边缘提取受到影响,则导致定位失准。因此眼睛内侧和外侧定位精度相对较低。从不同的温差分布组的实验结果来看,温差较大组的精度较低。这主要是因为温差的大变化会掩盖由于生理结构特点形成的温度特异性,且会直接影响边缘提取精度,从而造成定位失准。

图 10 为一个典型的纵向定位错误实验结果。在对该热像图的定位过程中,由于拍摄对象眼睛没有完全睁开,导致瞳孔定位失准。同时,虽然边缘提取可以对眼睛内外侧进行定位,但由于本文采用了边缘与温度特异性相结合的方法来定位眼睛内外侧位置,而眼睛外侧温度特异性较小,因此导致对眼睛外侧的定位发生偏差。由于拍摄角度的原因,其右眼内侧温度特异性相对较弱,导致右眼内侧定位发生了失准。

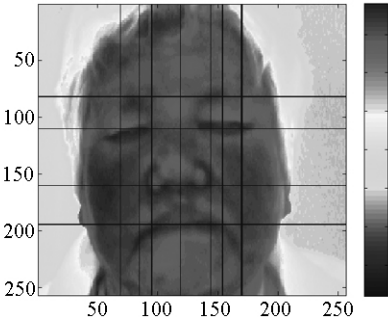


图 10 典型的纵向定位错误

所有拍摄对象的横向定位精度如表 3 所示。由该实验结果可以看到,对于红外热像图的人脸器官定位,横向定位精度要低于纵向定位精度。而在横向定位中,眼睛和鼻子的定位精度相对较高,眉骨其次,最差的为嘴部定位。其主要原因在于眼睛和鼻孔的定位依赖于由人体生理结构造成的温度特异性,因此可靠性较高;眉骨采用的是温度特异性与边缘检测的联合定位方法,易受到干扰;而嘴部的定位完全依赖于边缘提取,对于红外热像而言,嘴部的边缘特征并不明显,因此定位精度较差。图 11 中的嘴部定位错误就是这个原因。

表 3 横向定位线精度

定位部位	温差正常组/%	温差较大组/%	温差较小组/%	精度/%
眉骨	100.00	83.33	84.62	95.38
眼睛	95.65	100.00	100.00	96.92
鼻孔	95.65	100.00	100.00	96.92
嘴巴	91.30	83.33	92.31	90.77

由以上分析可知,温差变化虽然会在一定程度

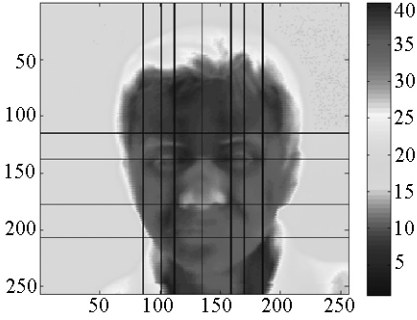


图 11 典型的横向定位错误

上影响定位精度,但其影响在可接受范围内。图 12 分别给出了三个不同组别下的对器官进行定位的典型结果。由此可以看到,不同组别的人群在面部温度的分布上有较大不同。对于温差较小的组别,必然会造成温度特异性不明显和边缘特征不明显。由于温度特异性主要由生理原因造成,因此,虽然在温差较小的组中温度特异性不强,但仍可以通过特异性进行较好的定位。边缘的不理想可以通过二者的融合进行弥补。这也解释了表 2 和表 3 中部分定位线不精确的原因。对于温差较大的实验组,它对定位精度的影响原因与温差较小组别类似,但影响结果相反,即其温度特异性和边缘均出现较多的干扰因素。对于过多的干扰因素,由于本算法中集成了面部器官分布特点的先验知识,因此可以做到较好的克服,其定位结果在可接受范围内。该实验表明,将温度特异性与边缘特征相结合,配合面部分布的先验知识,可以克服温差变化对精度的影响,定位结果具有一定的鲁棒性。因此,本算法对拍摄对象的面部温度要求比较宽松。

实验表明,本文所提出的算法对于一些其他常见的面部干扰可以进行很好的规避,如图 13 所示。由该组实验可知,由于采用了可基于温度的面部区域划分,因此可以避免由拍摄对象长发造成的影响;

由于采用了温度特异性和边缘检测联合定位算法,因此对于面部温度递变和无眉毛的拍摄对象,同样可以取得较为理想的器官定位结果,具有良好的泛化能力。

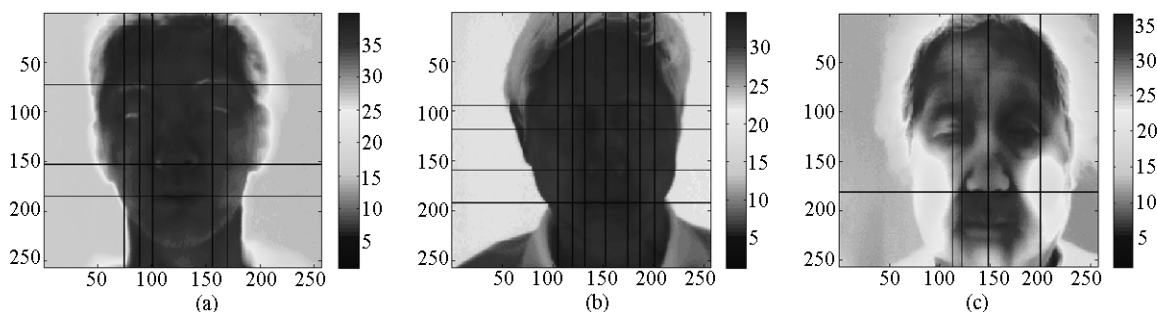


图 12 三个组别下的典型实验结果示例

(a) 温差正常;(b) 温差较小;(c) 温差较大。

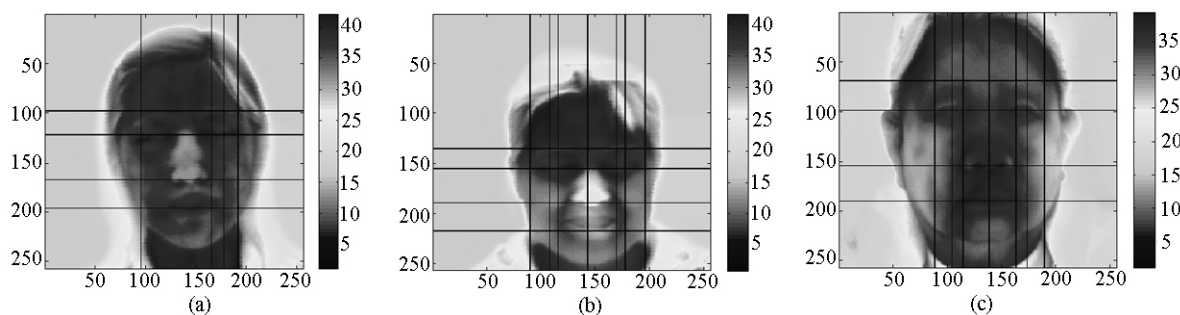


图 13 常见的面部干扰下的定位示例

(a) 长发;(b) 面部温度递变;(c) 无眉毛。

4 结 论

在红外人脸热像图中进行人脸器官定位是红外热像图应用中的基础性研究之一。本文从由人脸生理结构造成的面部温度特异性入手,结合由温度变化形成的边缘特征和人脸的器官分布规律完成红外人脸热像图中的人脸器官定位。在本方法中,对于器官的定位实质上是一种由粗到细的多特征融合定位过程。先通过人脸器官的空间分布确定器官的大体区域,然后再利用区域内的温度特异性和温度边缘确定器官的具体坐标。与传统的单独利用温度变化的定位算法相比,该方法具有运算速度快和抗干扰能力强的优点。实验证明,该方法不但对于常用的器官具有良好的定位特性,而且对于眉骨、瞳孔等特殊应用场合的定位也具有满意的定位精度。

通过对实验结果的分析发现,温度特异性与人脸面部生理特点相关,具有较好的定位精度。而边缘特征在红外热像中的相对不稳定造成了部分定位的失真。如何最大限度地发挥温度特异性的精度并降低边缘信息的不稳定是下一步需要继续深入的研究方向。

参考文献:

- [1] 伍世虔,韦礼珍,方志军. 红外人脸识别技术[J]. 中国图像图形学报, 2008, 13(12): 2260—2269.
WU Shi-qian, WEI Li-zhen, FANG Zhi-jun. Infrared Face Recognition Technology: A Survey [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(12): 2260—2269.
- [2] Gault T R, Blumenthal N, Farag A A, et al. Extraction of the Superficial Facial Vasculature, Vital Signs Waveforms and Rates Using Thermal Imaging [C]// 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. San Francisco, CA: IEEE, 2010: 1—8.
- [3] 刘旭龙,洪文学,张涛,等. 轻中度单侧 Bell 面瘫红外热辐射强度异常分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31 (05): 1266—1269.
LIU Xu-long, HONG Wen-xue, ZHANG Tao, et al. Anomaly of Infrared Thermal Radiation Intensity on Unilateral Mild to Moderate Bell's Palsy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(5): 1266—1269.
- [4] Prokoski F J, Coffin J S, Riedel R B. Method for Identifying Individuals from Analysis of Elemental Shapes Derived from Biosensor Data; US Patent, 5163094[P]. 1992-11-10.
- [5] Pavlidis I, Eberhardt N L, Levine J A. Seeing through the face of deception [J]. Nature, 2002, 415: 35—36.
- [6] ZHANG Baochang, ZHANG Lei, ZHANG David, et al. Directional binary code with application to PolyU near-infrared face

database[J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31: 2337—2344.

[7] Emi Nakato, Yumiko Otsuka, So Kanazawa , et al. I know this face: Neural activity during mother' face perception in 7- to 8-month-old infants as investigated by near-infrared spectroscopy [J]. Early Human Development,2011, 87:1—7.

[8] ZHANG Dong. A method of selecting acupoints for acupuntura treatment of peripheral facial paralysis by thermography[J]. The American Journal of Chinese Medicine, 2007, 35(6): 967—975.

[9] 孙敏,李德玉,俞梦孙. 基于 Harris 算子和 K-means 聚类的红外图像脸部特征自动定位[J]. 航天医学与医学工程, 2007, 20(4):285—288.

SUN Min, LI De-yu, YU Meng-sun. Harris Operator and K-means Clustering-based Facial Features Localization on Infrared Images[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2007, 20(4): 285—288.

[10] 孙统风,任子晖,陈伟,等. 一种热红外人脸分割的新方法[J]. 电子学报, 2010, 38(2A): 23—25.

SUN Tong Feng, REN Zi hui, CHEN Wei, et al. A New Method of Thermal Infrared Face Segmentation[J]. ACTA Electronica Sinica, 2010,38(2A):23—25.