



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办：中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
03
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

非真实感图像处理 P437





第20卷第3期（总第227期）

2015年3月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@radi.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@radi.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

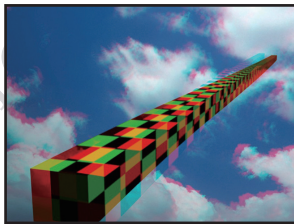
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

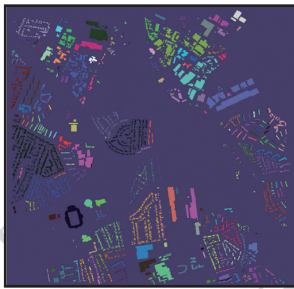
国内定价 50.00元



实时立体视觉系统中的深度映射(第0366页)



基于辐照度的运动模糊图像去模糊(第0395页)



面向智慧城市的3维城市在线可视化(第0445页)

综述

面向血管疾病诊断及预测分析的血流动力学模拟综述

徐梦佳, 杨金柱, 赵宏, 赵大哲 0297

图像处理和编码

多特征融合的车辆阴影消除

邱一川, 张亚英, 刘春梅 0311

图像分析和识别

基于局部时空特征方向加权的人体行为识别

李俊峰, 张飞燕 0320

对表情鲁棒的面部轮廓线3维人脸识别

常朋朋, 达飞鹏, 梅俊 0332

融合双层信息的显著性检测

姜霞霞, 李宗民, 匡振中, 刘玉杰 0340

面向动摄像机的高速运动目标检测

穆春迪, 谢剑斌, 闫玮, 刘通, 李沛秦 0349

匹配滤波在SAR目标单个散射部件检测中的应用

丁柏圆, 文贡坚, 钟金荣, 马聪慧 0357

图像理解和计算机视觉

实时立体视觉系统中的深度映射

李大锦, 白成杰 0366

遥感图像处理

GPU支持的SAR影像几何校正大规模并行处理

杨景辉, 程春泉, 张继贤, 黄国满 0374

基于正则化约束的遥感图像多尺度去模糊

谭海鹏, 曾炫杰, 牛四杰, 陈强, 孙权森 0386

第十届中国计算机图形学大会专栏

基于辐照度的运动模糊图像去模糊

方贤勇, 阚未然, 周健, 李黎, 郭延文 0395

对比度、颜色一致性和灰度像素保持的消色算法

王勋, 罗婷婷, 刘春晓, 彭浩宇 0408

结合因子图的多目的地地图布局优化

罗振珊, 张俊松, 范接鹏 0418

高阶连续的形状可调三角多项式曲线曲面

严兰兰, 韩旭里 0427

改进的自然图像铅笔画效果生成

黄志勇, 姚远, 张晶晶, 马凯, 任东 0437

面向智慧城市的3维城市在线可视化

潘斌, 郭小明, 陈明明, 陈为, 彭群生 0445

CONTENTS

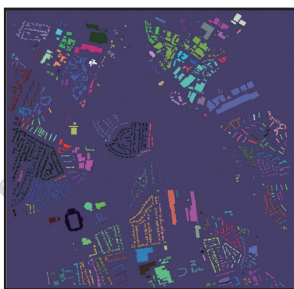
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Depth mapping in real-time stereoscopic systems (P0366)



Deblurring of motion blurred images based on the irradiance(P0395)



Online 3D city visualization for smarter cities(P0445)

Review

Survey of hemodynamics simulation for diagnosis and prediction in vascular disease

Xu Mengjia, Yang Jinzhu, Zhao Hong, Zhao Dazhe 0297

Image Processing and Coding

Vehicle shadow removal with multi-feature fusion

Qiu Yichuan, Zhang Yaying, Liu Chunmei 0311

Image Analysis and Recognition

Human behavior recognition based on directional weighting local space-time features

Li Junfeng, Zhang Feiyan 0320

Expression-robustness 3D face recognition based on facial profiles

Chang Pengpeng, Da Feipeng, Mei Jun 0332

Image saliency detection based on two-layer information fusion

Jiang Xiaxia, Li Zongmin, Kuang Zhenzhong, Liu Yujie 0340

Detecting high-speed moving targets in moving camera environments

Mu Chundi, Xie Jianbin, Yan Wei, Liu Tong, Li Peiqin 0349

The application of matched filter in detecting single scattering parts of SAR targets

Ding Boyuan, Wen Gongjian, Zhong Jinrong, Ma Conghui 0357

Image Understanding and Computer Vision

Depth mapping in real-time stereoscopic systems

Li Dajin, Bai Chengjie 0366

Remote Sensing Image Processing

GPU supported massively parallel processing for geometric correction of SAR imagery

Yang Jinghui, Cheng Chunquan, Zhang Jixian, Huang Guoman 0374

Remote sensing image multi-scale deblurring based on regularization constraint

Tan Haipeng, Zeng Xuanjie, Niu Sijie, Chen Qiang, Sun Quansen 0386

Column of Chinagraph'2014

Deblurring of motion blurred images based on the irradiance

Fang Xianying, Kan Weiran, Zhou Jian, Li Li, Guo Yanwen 0395

Decolorization with contrast, color consistency and grayscale pixel preservation

Wang Xun, Luo Tingting, Liu Chunxiao, Peng Haoyu 0408

Synthesizing multi-destinations map with factor graph

Luo Zhenshan, Zhang Junsong, Fan Jiepeng 0418

Higher-order continuous shape adjustable trigonometric polynomial curve and surface

Yan Lanlan, Han Xuli 0427

Improved algorithm for natural image pencil drawing production

Huang Zhiyong, Yao Yuan, Zhang Jingjing, Ma Kai, Ren Dong 0437

Online 3D city visualization for smarter cities

Pan Bin, Guo Xiaoming, Chen Mingming, Chen Wei, Peng Qunsheng 0445

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)03-0332-08

论文引用格式: Chang P P, Da F P, Mei J. Expression-robustness 3D face recognition based on facial profiles[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(3): 0332-0339. [常朋朋, 达飞鹏, 梅俊. 对表情鲁棒的面部轮廓线 3 维人脸识别[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(3): 0332-0339.] [DOI: 10.11834/jig.20150304]

对表情鲁棒的面部轮廓线 3 维人脸识别

常朋朋^{1,2}, 达飞鹏^{1,2}, 梅俊^{1,2}

1. 东南大学自动化学院, 南京 210096; 2. 东南大学复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 南京 210096

摘要: 目的 表情变化是 3 维人脸识别面临的主要问题。为克服表情影响, 提出了一种基于面部轮廓线对表情鲁棒的面部轮廓线 3 维人脸识别方法。方法 首先, 对人脸进行预处理, 包括人脸区域切割、平滑处理和姿态归一化, 将所有的人脸置于姿态坐标系下; 然后, 从 3 维人脸模型的半刚性区域提取人脸多条垂直方向的轮廓线来表征人脸面部曲面; 最后, 利用弹性曲线匹配算法计算不同 3 维人脸模型间对应的轮廓线在预形状空间(preshape space)中的测地距离, 将其作为相似性度量, 并且对所有轮廓线的相似性度量加权融合, 得到总相似性度量用于分类。结果 在 FRGC v2.0 数据库上进行识别实验, 获得 97.1% 的 Rank-1 识别率。结论 基于面部轮廓线的面部轮廓线 3 维人脸识别方法, 通过从人脸的半刚性区域提取多条面部轮廓线来表征人脸, 在一定程度上削弱了表情的影响, 同时还提高了人脸匹配速度。实验结果表明, 该方法具有较强的识别性能, 并且对表情变化具有较好的鲁棒性。

关键词: 3 维人脸识别; 表情变化; 面部轮廓线; 预形状空间; 测地距离

Expression-robustness 3D face recognition based on facial profiles

Chang Pengpeng^{1,2}, Da Feipeng^{1,2}, Mei Jun^{1,2}

1. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Systems of Engineering,
Ministry of Education, Ministry of Education, Nanjing 210096, China

Abstract: **Objective** Given the non-intrusive nature and broad surveillance application of face recognition, this technology has drawn considerable attention in the fields of pattern recognition and computer vision. However, expression variation is one of the main challenges in 3D face recognition because the geometric shape of a face changes drastically under expression variation. For instance, an open mouth can significantly change the topology of the facial surface, which can degrade the performance of a 3D face recognition system. To handle facial expressions, a novel 3D face recognition method based on facial profiles is proposed. **Method** First, the pose of a cropped face is automatically corrected on the basis of principal component analysis, and all facial scans are transformed into a uniform pose coordinate system. A set of vertical facial profiles in the upper half face region is then extracted to represent a 3D facial scan. Hence, the shapes of two facial scans can be matched by fitting the shapes of the corresponding facial profiles. Open curve analysis algorithm is applied to calculate the geodesic distance between a pair of facial profiles extracted from different facial scans. The geodesic distance is used as a similarity measure. Finally, two facial scans can be matched by using the weighted sum of all levels

收稿日期: 2014-07-17; 修回日期: 2014-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51175081); 教育部博士点基金项目(20130092110027)

第一作者简介: 常朋朋(1989—), 男, 东南大学自动化学院控制理论与控制工程在读硕士研究生, 主要研究方向为计算机视觉与 3 维人脸识别。E-mail: ppchangchn@gmail.com

通信作者: 达飞鹏, 教授, E-mail: dafp@seu.edu.cn

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51175081); Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (20130092110027)

of the corresponding geodesic distance. **Result** One of the large stavailable public domain 2D and 3D human face datasets is the Face Recognition Grand Challenge (FRGC) v2.0, which has been widely used in the literature. Two experiments are conducted using the FRGC v2.0 dataset: recognition and expression robustness experiments. In the recognition experiment, the earliest neutral 3D facial scan of every individual is selected to create a gallery of 466 facial scans, and the rest are used as probes. We test three dataset partition methods that are commonly used in existing 3D face recognition systems, which also use FRGC v2.0 as the testing dataset (i.e., non-neutral vs. neutral, all vs. neutral, and neutral vs. neutral). The Rank-1 recognition rates of our proposed approach in the cases of non-neutral vs. neutral, all vs. neutral, and neutral vs. neutral are 95.2%, 97.1%, and 98%, respectively. In the expression-robustness experiment, we consider the gallery in the recognition experiment, and 816 facial scans with an open mouth from the FRGC v2.0 dataset are used as the testing set for face recognition. When the facial profiles are extracted from all the facial regions as features, the Rank-1 recognition rate is 82.8%, whereas that of our proposed method is 93.5%. **Conclusion** Achieving high accuracy in the presence of expression variation is one of the most challenging aspects of 3D face recognition. To address this problem, a 3D face recognition method based on facial profiles is proposed. A set of vertical facial profiles are then extracted to represent facial surface. Given that these facial profiles are extracted from the semi-rigid region of a face, our proposed approach weakens the adverse effects caused by facial expression, especially large facial expression deformation, and consequently improves the efficiency of face matching. Experiments are performed using the FRGC v2.0 dataset to demonstrate the effectiveness of our algorithm. Results confirm the expression-robustness of the proposed method.

Key words: 3D face recognition; expression variation; facial profiles; pre-shape space; geodesic distance

0 引言

与虹膜识别、指纹识别等生物特征识别技术相比,人脸识别具有自然性、非强制性、非接触性等优点,在门禁系统、视频监控、机场安检、智能空间、自然人机交互等方面有广阔的应用前景。传统的2D人脸识别主要是基于灰度图或彩色图像,在约束环境下能够获得很好的识别性能,但仍受光照、姿态、表情等因素的影响,这极大地限制了2D人脸识别的发展。3D人脸识别主要是根据人脸的3D形状信息进行识别,且几乎不受光照、姿态的影响,因此3D人脸识别成为近年来学术界的研究热点^[1-2]。

与2D人脸识别相比,虽然3D人脸具有很大的优势,但是由于人脸的3D形状非常容易受到表情变化的影响,因此克服表情变化影响是3D人脸识别研究的难题之一。为了解决表情变化的问题,研究人员相继提出了很多解决方案^[2]。根据特征的形式,主要分为3类,分别是基于空域直接匹配的方法、基于局部特征的方法和基于全局特征的方法。

基于空域直接匹配的方法是直接对3D人脸曲面进行匹配。Chang等人^[3]提出了一种基于刚性区域匹配的自适应选择算法,从对表情不敏感的鼻子

附近选择3个重叠区域分别进行ICP匹配,最后将匹配结果在决策级融合。Mian等人^[4]提取鼻子区域、额头—眼睛区域后,分别利用改进的ICP算法配准,最后将配准结果采用乘积规则进行融合,获得了很好的识别效果。基于局部特征的方法主要是从3D人脸曲面提取有效地局部特征(比如局部描述符、曲线特征、统计特征等)进行匹配。Chua等人^[5]利用人脸曲面上每点邻域内一条闭合曲线为脸部各点建立PS(point signature),然后基于PS特征,采用投票的办法来匹配人脸。Pan等人^[6]利用镜像模型匹配方法检测3D人脸对称面,从而获得人脸中心侧面轮廓线。对齐轮廓线后,采用改进的Hausdorff距离度量轮廓线之间的相似度。Drira等人^[7]提出利用人脸的径向曲线表征人脸曲面,然后根据黎曼几何理论计算径向曲线之间的测地距离作为相似度。基于整体特征的方法注重3D人脸模型的整体特征。Bronstein等人^[8]假设表情变化引起的人脸曲面形变满足等距变换。在利用多维标度(MDS)将3D人脸曲面变形到规范曲面后用ICP匹配完成识别。Lu等人^[9]采用薄板样条(TPS)函数学习表情变量,在将库集中无表情人脸合成带有表情的人脸后再与测试人脸匹配进行识别。Wang等人^[10]提出一种基于向导的形变模型方法。该方法首先利

用训练集中的无表情人脸和对应的有表情人脸训练人脸的刚性区域,然后以库集无表情人脸为向导,将测试人脸的非刚性区域向库集人脸形变。最后将形变后的测试人脸与库集人脸比较完成识别。

除表情变化这一因素外,时间代价也是3维人脸识别研究的一个重要方面。由于3维人脸数据量非常庞大,导致一次匹配所需要的时间远远大于2维图像。过高的时间代价使得3维人脸识别算法难以应用于大规模的数据库,因此提取简单的、有效的特征非常有意义。针对表情问题和为了降低3维人脸识别算法的复杂度,本文提出了一种基于半刚性区域面部轮廓线匹配的3维人脸识别方法。首先对预处理之后的人脸根据几何坐标信息在上半张人脸提取19条垂直方向的面部曲线。然后根据黎曼几何的相关理论,采用测地距离来度量两张人脸对应曲线的相似度。最后,为了度量两张人脸之间的相似性,将得到的两张人脸对应曲线的相似度采用求和法则进行融合用于3维人脸识别。选取人脸半刚性区域的面部轮廓线来表征人脸,避开了受表情影响较大的嘴部区域,有效减弱了表情的影响。在FRGC v2.0数据库上的实验结果表明,本文算法具有较高的识别率,并且对于表情变化具有较好的鲁棒性。

1 预处理与面部轮廓线提取

1.1 预处理

FRGC v2.0数据库^[11]的3维人脸模型通常包含人脸区域以及耳朵、头发和肩膀等冗余区域,并且含有离群点和噪声等。因此,在提取特征之前,需要对人脸数据进行预处理。首先,确定鼻尖点^[12],鼻尖点定位以后,以鼻尖点为中心,以 $r = 90\text{ mm}$ 半径做球体,球体内包含的人脸区域即为切割的人脸区域。然后,根据高斯滤波器对原始人脸数据做平滑处理。原始人脸和平滑切割后的人脸如图1(a)(b)所示。

对切割后的人脸点云采用主成分分析(PCA),可以得到3个互相垂直的主方向,将最大特征值对应的特征向量作为 y 轴,最小特征值对应的特征向量作为 z 轴,建立右手坐标系,在该坐标系下人脸具有相同的正面姿态。该坐标系被称为姿态坐标系(PCS)。以鼻尖点为PCS的坐标原点,将切割后的

人脸数据都转换到PCS中,实现人脸姿态的归一化,如图1(c)所示。

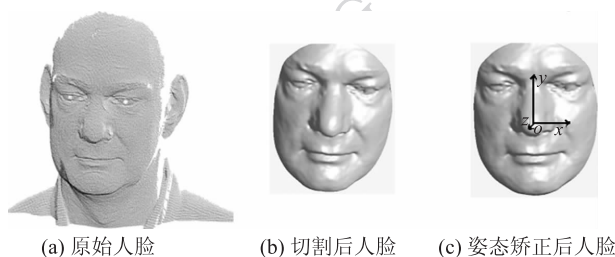


图1 人脸切割和姿势矫正

Fig. 1 Face cropping and normalization

1.2 面部轮廓线分析

表情变化是3维人脸识别面临的主要问题之一。在表情变化下,人脸曲面会发生非刚性形变,鼻子、额头区域通常被认为是受表情影响较小的区域,而嘴部区域则受表情影响较大,特别是嘴巴张开时会严重地改变人脸的拓扑结构,从而大大降低识别效果。为了描述方便,将人脸的上半部分叫做半刚性区域(即由 $y \geq 0$ 的点构成的区域),而人脸的下半部分叫做非刚性区域(即由 $y < 0$ 的点构成的区域)。从图2中可以看出,当发生表情变化时,特别是嘴巴张开,人脸半刚性区域的面部轮廓线(蓝色部分)形变较小,而人脸非刚性区域的面部轮廓线(红色部分)形变却较大,这极大地增加了类内差异,导致分类器误判。由此启发,本文避开嘴巴区域,只从人脸半刚性区域提取面部轮廓线,以求提高识别率。

1.3 面部轮廓线提取

在姿态坐标系中,记位于 xoz 平面上方的3维人脸曲面为 S 。为提取人脸面部轮廓线簇,首先要检测人脸对称面。本文利用镜像匹配算法^[6]确定人脸对称面,并记人脸对称面为 p 。以 p 切割人脸曲面 S ,可以得到上半张人脸的中心面部轮廓线。然后将平面 p 分别沿着 x 轴正方向和负方向等间距(间距为 5 mm)平移,并与人脸曲面 S 相交,得到上半张人脸的多条面部轮廓线,如图3(a)所示。

1.4 面部轮廓线重采样

由于人脸点云分布不均匀,导致提取的面部轮廓线上的点的分布不均匀,因此匹配前需要对其重采样。以平面 p 与 xoy 平面相交的直线作为参考曲线,重采样过程如图3(b)所示,红色曲线为参考曲线。在参考曲线上每隔 3 mm 采样一个点,

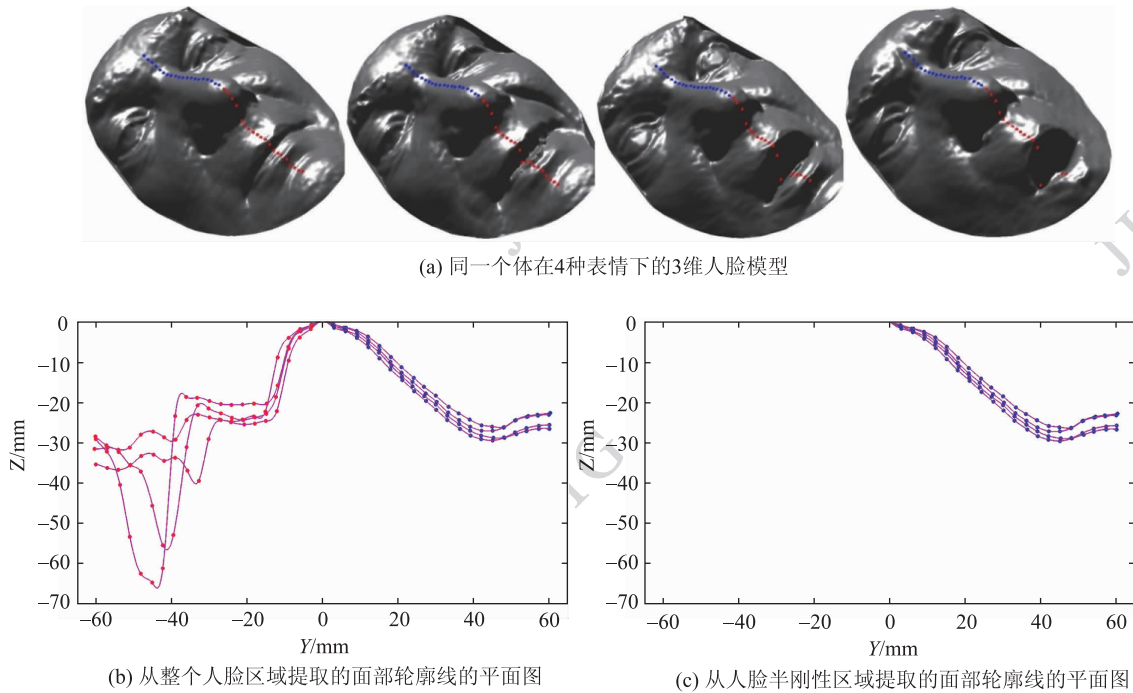


图2 同一个体人脸半刚性区域和非刚性区域的面部轮廓线的对比

Fig. 2 A comparison between facial profiles extracted from the semi-rigid and the non-rigid regions of a face

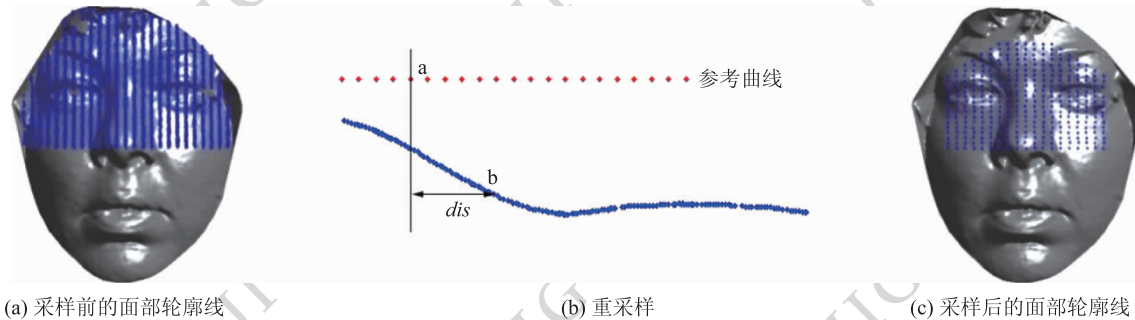


图3 面部轮廓线提取及重采样

Fig. 3 Facial profiles extracting and resampling

对于参考曲线上的每个点,选择待采样曲线上与该点在参考曲线方向上的距离 dis 最近的点作为待采样曲线上的采样点,采样后的面部轮廓线如图3(c)所示,其中从左到右,轮廓线采样长度分别为42 mm、45 mm、48 mm、51 mm、54 mm、57 mm、60 mm、60 mm、60 mm、60 mm、60 mm、60 mm、60 mm、57 mm、54 mm、51 mm、48 mm、45 mm、42 mm。

注意,由于FRGC v2.0数据库中的许多模型的额头以及脸颊两侧的部分区域会有头发遮挡,例如图3(a)。因此,为了避免头发遮挡引入误判,本文在重采样过程中并未对图3(a)中面部轮廓线全部采样,而是根据经验及坐标信息首先舍弃了人脸的

额头和脸颊两侧的部分区域。然后根据实验最终选择了19条面部轮廓线来表征人脸曲面 S ,如图3(c)所示。以面部轮廓线来表征3维人脸曲面 S ,不仅去除了受表情因素影响很大的嘴部区域和受头发遮挡的额头脸颊两侧部分区域,而且大大简化了3维人脸曲面的数据量。

2 曲线匹配

首先,假设曲线 $\beta: I \rightarrow \mathbf{R}^3, I=[0,1]$ 是上述提取的一条面部轮廓线的参数方程,其中 I 为参数域。为了分析曲线 β 的形状,采用 square-root velocity function (SRVF)^[13] 来描述曲线 β ,即

$$q(t) \equiv F(\dot{\beta}(t)) = \frac{\dot{\beta}(t)}{\sqrt{\|\dot{\beta}(t)\|}} \quad (1)$$

式中,映射 $F: \mathbf{R}^3 \rightarrow \mathbf{R}^3, v \mapsto \frac{v}{\sqrt{\|v\|}}$, $\|\cdot\|$ 是欧几里得范数。 $q(t)$ 是一个特别的函数,它可以描述曲线的形状,并且对于曲线形状分析非常方便。对于曲线形状的比较,它可以将经典的弹性度量转化为 2 范数度量。在 SRVF 描述下,定义集合 C^0 为

$$C^0 = \left\{ q: I \rightarrow \mathbf{R}^3 \mid \int_I \|q(t)\|^2 dt = 1 \right\} \subset L^2(I, \mathbf{R}^3) \quad (2)$$

C^0 包含了 $\mathbf{R}^3$ 中所有张开的单位长度的曲线,称为张开曲线的预形状空间(preshape space)。将 $\mathbf{R}^3$ 上点积限制于 C^0 的切空间内,则 C^0 就是一个黎曼流形。根据黎曼流形的相关理论可知,可以计算 C^0 空间中任意两个元素之间的测地线路径和测地线长度。

在 C^0 中,为了比较两条曲线的形状,以两条曲线在 C^0 中的测地距离作为相似度。由 C^0 的定义可知, C^0 是一个球面。因此,任给 C^0 中的两点 $q_1(t)$ 和 $q_2(t)$,则 $q_1(t)$ 和 $q_2(t)$ 间的测地距离为

$$Dis(q_1, q_2) = \arccos\left(\int_I \langle q_1(t), q_2(t) \rangle dt\right) \quad (3)$$

测地线路径为

$$\alpha(\tau) = \frac{1}{\sin(\theta)} (\sin(\theta(1-\tau))q_1(t) + \sin(\theta\tau)q_2(t)), \tau \in [0, 1] \quad (4)$$

式中, $\theta = Dis(q_1, q_2)$ 。

通过 SRVF 来描述参数化的曲线 β 及施加约束 $\int_I \|q(t)\|^2 dt = 1$, 已经消除了平移变换和尺度变换。但是旋转变换和重新参数化的问题依然存在。即,对 C^0 中曲线 β 作旋转变换和重新参数化会改变它的 SRVF 描述,但是它本身的形状并未改变。为了解决这个问题,定义旋转群 $SO(3)$ (特殊正交群)和重新参数化群 Γ (由 I 上的所有保向微分同胚映射构成的集合)。例如,对于曲线 $\beta: I \rightarrow \mathbf{R}^3, I = [0, 1]$ 和函数 γ , 曲线 $\beta \circ \gamma$ 是 β 的另一种参数化形式。 β 的 SRVF 描述由 $q(t)$ 变为了 $\sqrt{\dot{\gamma}(t)}q(\gamma(t))$ 。对于 q , 定义其等价类 $[q]$ 为

$$[q] = \{ \sqrt{\dot{\gamma}(t)}Oq(\gamma(t)) \mid O \in SO(3), \gamma \in \Gamma \} \quad (5)$$

由这样的等价类 $[q]$ 构成的集合 $S \doteq \{ [q] \mid q \in C^0 \}$, 称为曲线的形状空间(shape space)^[13]。为了获得 S 中元素间的测地距离,需要解决下面的最优化问题

$$(O^*, \gamma^*) = \arg \min_{(O, \gamma) \in SO(3) \times \Gamma} d_c(q_1, \sqrt{\dot{\gamma}}O(q_2 \circ \gamma)) \quad (6)$$

解决式(6)最优问题可分别利用奇异值分解^[14]计算最优的旋转矩阵和动态规划算法^[15]求解最优的重新参数化矩阵。若令

$$q_2^*(t) = \sqrt{\dot{\gamma}^*(t)}O^*q_2(\gamma^*(t)) \quad (7)$$

是 $[q_2]$ 中最优的元素,则 $[q_1]$ 和 $[q_2]$ 在 S 中的测地线距离为

$$Dis([q_1], [q_2]) \doteq Dis(q_1, q_2^*) \quad (8)$$

3 轮廓线融合与人脸匹配

库集人脸模型的面部轮廓线的提取在离线时进行。在线识别时,首先提取测试模型的 19 条面部轮廓线,然后根据 SRVF 计算测试模型和库集模型对应的面部轮廓线间的相似度。假设库集有 M 个模型,可得到测试模型和库集模型对应的第 r 条面部轮廓线间的相似度向量 $S_r = [S_{1r}, S_{2r}, \dots, S_{Mr}]$ ($r = 1, 2, \dots, 19$)。为了将不同面部轮廓线的相似度向量进行融合,首先按照最大—最小原则分别对 S_r 的进行归一化,即

$$S'_r = \frac{S_r - \min(S_r)}{\max(S_r) - \min(S_r)} \quad (9)$$

然后对归一化后的相似度向量 S'_r 采用决策级融合中的加权求和规则融合,即

$$S = \sum_{j=1}^{19} w_j S'_j \quad (10)$$

式中, $w_j = r_j / \sum_{j=1}^{19} r_j$, r_j 表示第 j 条面部轮廓线的 Rank-1 识别率(Rank-1 识别率是指识别系统将测试人脸与库集所有人脸进行匹配,返回最相似的 1 个模型时,得到的识别系统的正确识别率)。最后根据最近邻法则选取 S 中最小元素对应的库集人脸作为识别结果。

4 实验结果与分析

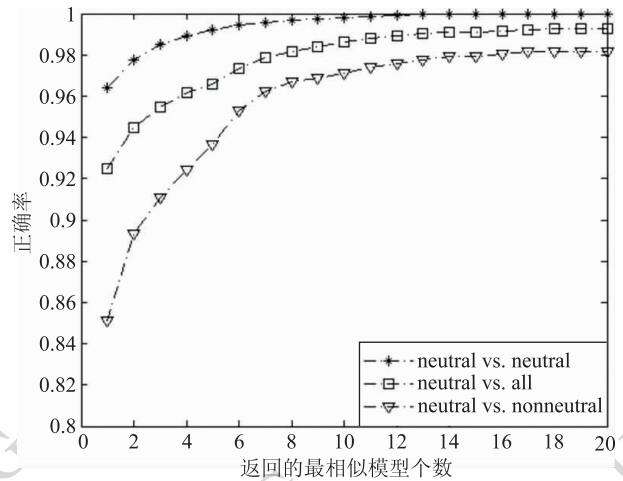
FRGC v2.0 是一个大型的公共人脸数据库,应

用极为广泛。该数据库由两部分组成:训练集和测试集。训练集包含 277 个人的 943 幅 3 维人脸,主要在 2003 年春季采集;测试集包括 466 个 4 007 幅 3 维人脸,主要在 2003 年秋季和 2004 年春季采集。测试集中大约有 60% 的 3 维模型是无表情人脸,其余是带表情的人脸,包含微笑、大笑、皱眉、鼓腮、吃惊等各种表情。

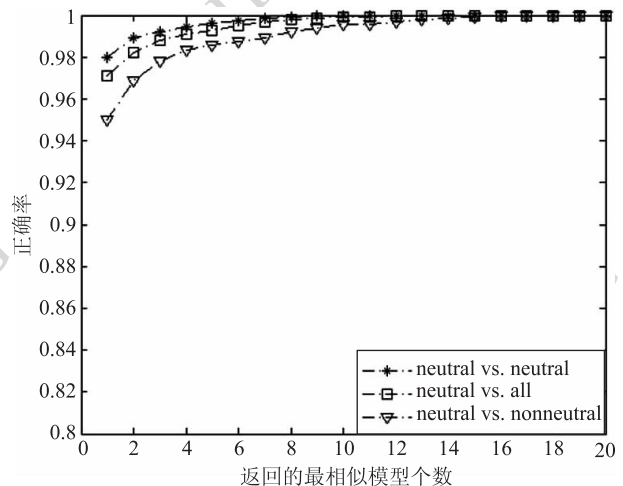
为了测试本文算法的性能,在 FRGC v2.0 数据库上进行了身份识别实验。身份识别实验是一对多的过程,目的是从库集中找出与测试人脸最相似的个体。人脸识别系统的性能由 CMC (cumulative match characteristic) 曲线度量,该曲线反映了系统返回最相似模型的个数与正确率之间的关系。

4.1 识别实验

首先,在 FRGC v2.0 数据库的测试集中选取每个人的一幅无表情人脸,共 466 个组成库集;剩下的所有人脸用于测试。本文分 3 种情况进行实验:1)有表情人脸与无表情人脸比较 (nonneutral vs. neutral);2)所有人脸与无表情人脸比较 (all vs. neutral);3)无表情人脸与无表情人脸比较 (neutral vs. neutral)。对 3 个测试人脸集合分别进行实验,通过比较从整张人脸区域提取面部轮廓线和从人脸半刚性区域提取面部轮廓线的身份识别实验结果(使用相同的曲线匹配算法),验证本文算法的性能及人脸非刚性区域对识别的影响。实验结果如图 4 及表 1 所示。



(a) 整张人脸区域



(b) 人脸半刚性区域

图 4 CMC 曲线

Fig. 4 CMC curve

表 1 识别结果比较

Table 1 Identification results comparison

/%

	无表情人脸测试集	全部人脸测试集	有表情人脸测试集
整张人脸区域	96.4	92.5	85.1
人脸半刚性区域	98.0	97.1	95.2

从图 4 和表 1 中可以看出,在无表情人脸测试集、全部人脸测试集和表情人脸测试集上,使用人脸半刚性区域进行识别,得到的识别率分别为 98%, 97.1% 和 95.2%,表明本文算法取得了较好的识别效果,且对表情具有较好的鲁棒性。另外,与使用整张人脸区域相比,精度分别提高了 1.6%, 4.6% 和 9.9%。这是因为本文从人脸半刚性区域提取多条面部轮廓线进行识别,不仅避免了受表情影响较大的嘴部区域,而且在提取轮廓线时,也考虑到额头和

脸颊两侧部分区域受头发遮挡的问题,因此得到较高地识别精度。

4.2 对大表情的鲁棒性实验

为了验证本文算法对于大表情的鲁棒性(对于大表情变化,主要考虑的是嘴巴张开的情形),从 FRGC v2.0 数据库中选择了 816 个嘴巴张开的 3 维人脸模型^[16]作为测试集进行身份识别实验,图 5 列出了 FRGC v2.0 数据库中一些嘴巴张开的 3 维人脸模型。实验结果如图 6 所示。使用整张人脸区域获得

82.8% 的 Rank-1 识别率,而使用人脸半刚性区域得到的 Rank-1 识别率为 93.5%,精度提高了 12.9%。实验结果表明表情变化,特别是人脸嘴部受表情影响而张开的情形,对识别算法精度的影响是很大的,同时也说明了本文算法对于大表情变化具有很好地鲁棒性。



图 5 测试集中嘴巴张开的 3 维人脸模型例子

Fig. 5 Examples of the selected faces with an open mouth

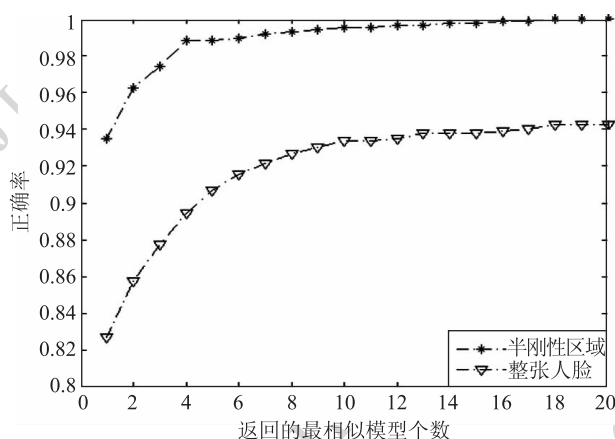


图 6 CMC 曲线

Fig. 6 CMC curve

4.3 与其他算法的比较

为了验证本文算法的效能,分别将本文算法与其他也在 FRGC v2.0 数据库中进行相同实验的算法的结果进行比较,如表 2 所示。

表 2 不同算法的结果比较

Table 2 Comparison between different methods

算法	Rank-1 识别率/%
ICP 基准	75.7
文献[3]	91.9
文献[17]	96.5
文献[18]	98.3
本文	97.1

文献[3]从人脸鼻子附近选择 3 个互相重叠的子区域分别进行 ICP 匹配,最后将匹配结果在决策级融合,虽然削弱了表情的影响,但是没有充分利用人脸其他区域的信息。文献[17]利用 PCA 建立了表情形变模型,将测试人脸向库集人脸形变。它是基于整体的方法,充分利用人脸的所有信息,因此取得了较高的识别率。文献[18]在深度图残差上先利用 LBP、Haar、Gabor 3 个局部描述符提取特征,然后采用 boosting 分类器提取效果较好地特征来识别个人身份,虽然识别率比本文算法高,但是该方法需要大量的人脸数据用于学习,因此时间代价很高,难以满足人脸识别系统的实时性,而本文算法不需要学习,因此更具实用性。

4.4 时间代价分析

电脑配置为 CoreTM i5 2.33 GHz CPU, 2.0 GB 内存,使用 Matlab 与 C++ 混合编程。表 3 列出了将一个测试模型与库集中所有的 466 个模型分别匹配过程中各环节所需要的时间。

表 3 算法各步骤的时间代价分析

Table 3 Time cost analysis of different steps /s

预处理	曲线提取	人脸匹配(一对一)	总耗时
3.6	0.79	0.08	41.67

从表 3 可以看出,识别过程的时间主要消耗在预处理过程,包括对原始点云的切割、平滑、姿态归一化和人脸对称面的提取上,而曲线提取和人脸匹配所耗时间较短,说明本文所提出的特征较为有效。总的来看,在库集人脸为 466 张时,识别总耗时为 41.67 s,在可接受范围之内。

5 结论

本文提出了一种基于半刚性区域面部轮廓线匹配的 3 维人脸识别方法。该方法从人脸的半刚性区域提取若干条面部轮廓线以表征人脸,从而将人脸曲面的匹配转化为人脸面部曲线的匹配。根据最新的黎曼流形相关理论,以两条曲线在预形状空间中的测地距离作为相似性度量,并对所提取的曲线的相似度进行加权融合,完成识别。实验结果表明本文算法有较高的识别率,并且对于表情变化具有较好的鲁棒性。本文算法有如下特点:

1) 避开受表情影响较大的嘴部区域, 从受表情影响较小的人脸半刚性区域提取面部曲线用于匹配, 同时考虑了头发遮挡情形, 因而对表情变化具有较好地鲁棒性。

2) 基于SRVF描述的弹性曲线匹配算法, 对曲线的平移、旋转、尺度变换和重新参数化具有不变性, 能够有效度量曲线之间的相似程度, 并根据每条面部轮廓线对识别率的贡献给予不同的权重, 采用决策级融合中的加权求和规则融合, 进一步提高识别率。

3) 提取人脸面部曲线表征人脸, 将人脸曲面的匹配转化为曲线的匹配, 提高了人脸匹配速度。

参考文献 (References)

- [1] Li X L, Da F P. 3D face recognition based on profiles and rigid regions [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2010, 15(2): 266-273. [李晓莉, 达飞鹏. 基于侧面轮廓线和刚性区域的3D人脸识别[J]. *中国图象图形学报*, 2010, 15(2): 266-273] [DOI:10.11834/jig.20100213]
- [2] Bowyer K W, Chang K, Flynn P. A survey of approaches and challenges in 3D and multi-modal 3D + 2D face recognition [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2006, 101(1): 1-15. [DOI: 10.1016/j.cviu.2005.05.005]
- [3] Chang K, Bowyer K W, Flynn P. Adaptive rigid multi-region selection for handling expression variation in 3D face recognition [C] // *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Diego, CA, USA: IEEE Computer Society, 2005: 157-164. [DOI:10.1109/CVPR.2005.567]
- [4] Mian A S, Bennamoun M, Owens R A. Region-based matching for robust 3D face recognition [C] // *Proceedings of the British Machine Vision Conference*. Oxford, UK: The British Machine Vision Association, 2005: 1-10. [DOI:10.5244/C.19.33]
- [5] Chua C, Han F, Ho Y. 3D human face recognition using point signatures [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*. Grenoble, France: IEEE, 2000: 233-238. [DOI:10.1109/AFGR.2000.840640]
- [6] Pan G, Wang Y M, Qi Y P, et al. Finding symmetry plane of 3D face shape [C] // *Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition*. Hong Kong, China: IEEE, 2006: 1143-1146. [DOI:10.1109/IC-PR.2006.565]
- [7] Drira H, Amor B B, Daoudi M. Pose and expression-invariant 3D face recognition using elastic radial curves [C] // *Proceedings of the British Machine Vision Conference*. Aberystwyth, UK: The British Machine Vision Association, 2010: 1-11. [DOI:10.5244/C.24.90]
- [8] Bronstein A M, Bronstein M M, Kimmel R. Three dimensional face recognition [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2005, 64(1): 5-30. [DOI:10.1007/s11263-005-1085-y]
- [9] Lu X, Jain A K. Deformation modeling for robust 3D face matching [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(8): 1346-1356. [DOI:10.1109/TPAMI.2007.70784]
- [10] Wang Y, Pan G, Wu Z. 3D face recognition in the presence of expression: a guidance-based constraint deformation approach [C] // *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Minneapolis, Minnesota, USA: IEEE Computer Society, 2007: 1-7. [DOI:10.1109/CVPR.2007.383277]
- [11] Phillips P J, Flynn P J, Scruggs T, et al. Overview of the face recognition grand challenge [C] // *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Diego, CA, USA: IEEE Computer Society, 2006: 947-954. [DOI:10.1109/CVPR.2005.268]
- [12] Li X L, Da F P. Efficient 3D face recognition handling facial expression and hair occlusion [J]. *Image and Vision Computing*, 2012: 668-679. [DOI:10.1016/j.imavis.2012.07.011]
- [13] Joshi S, Klassen E, Srivastava A, et al. A novel representation for riemannian analysis of elastic curves in R^n [C] // *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Minneapolis, Minnesota, USA: IEEE Computer Society, 2007: 1-7. [DOI: 10.1109/CVPR.2007.383185]
- [14] Srivastava A, Klassen E, Joshi S, et al. Shape analysis of elastic curves in Euclidean spaces [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(9): 1415-1428. [DOI:10.1109/TPAMI.2010.184]
- [15] Frenkel M, Basri R. Curve matching using the fast marching method [C] // *Proceedings of 4th International Workshop Energy Minimization Methods in Computer Vision and Pattern Recognition*. Lisbon, Portugal: Springer-Verlag, 2003: 35-51. [DOI: 10.1007/978-3-540-45063-4_3]
- [16] Berretti S, Bimbo D, Pala P. 3D face recognition using iso-geodesic stripes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(12): 2162-2177. [DOI: 10.1109/TPAMI.2010.43]
- [17] Al-Osaimi F, Bennamoun M, Mian A. An expression deformation approach to non-rigid 3D face recognition [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 81(3): 302-316. [DOI:10.1007/s11263-008-0174-0]
- [18] Wang Y M, Liu J Z, Tang X O. Robust 3D face recognition by local shape difference boosting [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(10): 1858-1870. [DOI:10.1109/TPAMI.2009.200]