

基于有效能量的 3D 人脸鼻尖点检测与姿态矫正

郭小波¹, 周兆永², 李松阳¹

(1. 河南工程学院 计算机学院, 郑州 451191; 2. 西北农林科技大学 机械工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为提高鼻尖点检测与姿态矫正的精度, 结合有效能量判断曲面的凹凸性, 提出一种三维人脸鼻尖点检测与姿态矫正算法。利用有效能量在预处理后的三维人脸图像上确定候选鼻尖点, 并根据其均值和方差进行二次筛选, 将候选点最密集的区域作为鼻尖区域, 进一步得到鼻尖点。计算鼻尖点到三维人脸其他点的测地距离后切割出有效的人脸区域, 同时采用主成分分析法对其进行矫正, 通过迭代最近点算法精确对齐后得到对齐误差。基于大量三维人脸数据的仿真结果表明, 该算法的检测和矫正成功率分别达到 98.8% 和 98.3%, 运行耗时仅为 1.489 s。

关键词: 有效能量; 鼻尖点检测; 姿态矫正; 测地距离; 迭代最近点

中文引用格式: 郭小波, 周兆永, 李松阳. 基于有效能量的 3D 人脸鼻尖点检测与姿态矫正[J]. 计算机工程, 2018, 44(9): 236-242.

英文引用格式: GUO Xiaobo, ZHOU Zhaoyong, LI Songyang. Nasal tip detection and posture correction of 3D face based on effective energy[J]. Computer Engineering, 2018, 44(9): 236-242.

Nasal Tip Detection and Posture Correction of 3D Face Based on Effective Energy

GUO Xiaobo¹, ZHOU Zhaoyong², LI Songyang¹

(1. College of Computer, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China;

2. School of Mechanical Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

[Abstract] To improve the accuracy of the nasal tip point detection and posture correction, a three-dimensional human face nasal tip point detection and posture correction algorithm based on effective energy is proposed, which combines the judgment ability of effective energy for the surface concavity and convexity. Firstly, the nasal tip candidate points are determined by effective energy in the pre-processed 3D face image, then the second screening is carried out according to the mean and variance of the effective energy. The densest region with the most intensive candidate points is selected as the nasal tip region to further obtain the tip of the nose. The effective face area is cut off after calculating the geodesic distance from the tip of the nasal to the other points on the three-dimensional human face, the principal component analysis is used to make correction for the cut face area, and the alignment error is obtained by precise alignment of the Iterative Closest Point (ICP) algorithm. The comparison experiment is simulated based on a large number of 3D face data, and the results show that the nasal tip point detection and posture correction success rate of proposed algorithm respectively reach 98.8% and 98.3%, and the operation time is only 1.489 s.

[Key words] effective energy; nasal tip detection; posture correction; geodesic distance; Iterative Closest Point (ICP)

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0048152

0 概述

二维人脸识别^[1-3]容易受姿态变化的影响, 从而使识别率大幅降低。目前, 三维人脸识别^[4-5]已成为研究的热点, 三维人脸识别的方法多数基于特征点, 即将 2 个三维人脸的特征点相互对应匹配, 对齐到同一模式下, 根据某些特征描述符来判断 2 个模型的相

似度, 但这种方法容易受表情变化的影响^[6-7]。鼻尖点是人脸上一个重要的特征点, 因为鼻尖点是人脸最突出的一点, 并且是刚性区域^[8], 不受表情变化的影响。此外, 鼻子区域也能够表明人的头部姿态。在二维方面, 有些研究者用亮度值来定位鼻尖点, 认为和人脸中其他点相比较, 鼻尖点具有较低的亮度值^[9]。但是, 如果人是一个正面姿态并且直盯着相机

基金项目: 国家自然科学基金(61501174); 河南省科技厅科技攻关计划项目(172102210102, 182102310025)。

作者简介: 郭小波(1980—), 男, 副教授、博士, 主研方向为图像处理、模式识别; 周兆永、李松阳, 副教授、博士。

收稿日期: 2017-07-28 **修回日期:** 2017-09-05 **E-mail:** guoxb80@126.com

时,该方法就会失效,头部倾斜和侧面人脸也可能导致鼻尖点检测失败,因为鼻尖点的亮度值会随着姿态的变化随时发生变化。文献[10]提出用对比度和边缘检测来定位鼻尖点,但这种方法受表情变化的影响太大。在三维方面,文献[11]提出用水平切片去切割人脸,并在切片上画三角形,如果一个点在最大高度的三角形上,那么这个点可以作为鼻尖点候选点,这个方法对正面或者侧面人脸检测效果较好,但是当人脸朝上、下、左、右时,该方法无效,因为此时在水平切片上,鼻尖点不再是最突出的点。

针对上述问题,本文利用有效能量^[12]对曲面凹凸程度的优良判断能力,提出一种三维人脸鼻尖点检测与姿态矫正算法。首先通过有效能量对测试集进行第一次筛选,确定鼻尖点候选点;然后对手工标记的鼻尖点训练集计算鼻尖点上有效能量的均值和方差,经过训练得到分类器^[13],利用分类器对得到的候选点进行分类,进一步减少候选点的个数,根据点密度确定最终鼻尖点;之后计算鼻尖点到其他点的测地距离^[14-15],提取测地距离小于 r 的点为切割出的有效轮廓,利用主成分分析完成姿态粗略矫正;最后采用kd-tree加速的ICP算法^[16]进行精确矫正,减小匹配误差。

1 有效能量计算及改进方法

有效能量计算是一种判断三维点云上一点所在邻域的凹凸性的方法,如图1所示。

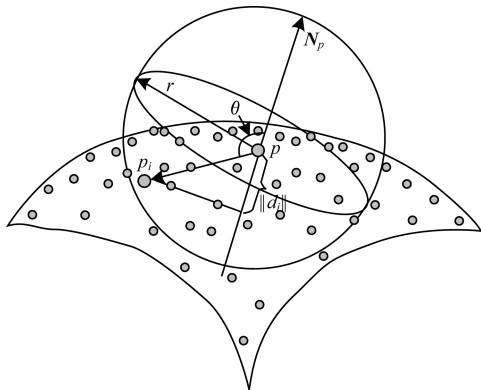


图1 有效能量计算示意图

对于三维点云上一点 p ,以 p 点为球心, r 为半径的球内包含的点云数据称为 p 的 r 邻域, N_p 为 p 点的单位法向量,则对邻域中任意一点 p_i ,有效能量 d_i 定义如下:

$$d_i = (p_i - p) \cdot N_p = \|p_i - p\| \cos \theta \quad (1)$$

其中, θ 为 $p_i - p$ 和 N_p 之间的夹角。从式(1)可以看出:当点 p 的 r 邻域所在的曲面近似为凸面时, θ 均为钝角,有效能量 d_i 的值均为负;当点 p 的 r 邻域所在的曲面近似为凹面时, θ 均为锐角,有效能量 d_i 的值均为正;相反地,当 p 的 r 邻域中所有的 d_i 的值均

为正时,则邻域所在的曲面近似为凹面;当 p 的 r 邻域中所有的 d_i 的值均为负时,则邻域所在的曲面近似为凸面^[17-18]。

但上述方法存在一定的缺陷,假设某一点的 r 邻域所在的曲面为凸面,可能因为个别噪点的影响使得这个邻域的有效能量存在正值,即这个点本来是要作为候选点筛选出来的,却因为噪点的影响而被去除,这就导致真正的鼻尖点被提前去除,无法检测到鼻尖点。因此,本文对此进行改进,通过下式计算邻域的总能量:

$$s_d(j) = \sum d_i, j = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中, N 表示三维人脸顶点总数, $s_d(j)$ 代表第 j 个顶点的邻域总能量。如果一个顶点的邻域总能量为负数,则认为这个点的邻域所在的曲面为凸面,将这个点作为鼻尖点候选点,从而避免个别噪声引起的鼻尖点被去除的误判。改进前后的筛选结果比较如图2所示。

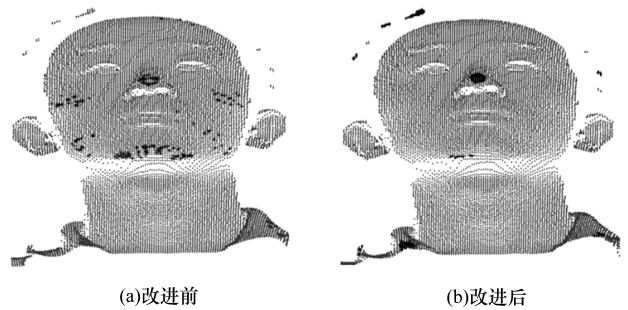


图2 有效能量计算改进前后的筛选结果比较

对于ply格式的三维模型而言,除了已知每一点的顶点坐标之外,还知道与每一点相关的三角面片,因此, p 点的单位法向量 N_p 可以通过对跟 p 点相关的三角面片的法向量求和获得。设与 p 点相关的三角面片有 M 个, M 个面片的法向量为 $N_1, N_2, \dots, N_M$,则:

$$N_p = \sum_{i=1}^M N_i \quad (3)$$

对于单纯的三维点云数据,对 p 点的邻域进行主成分分析,设 p 点的邻域集合为 $I_s = \{I_s^1, I_s^2, \dots, I_s^n\}$,计算邻域集合 I_s 的重心为 O_s :

$$O_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_s^i \quad (4)$$

计算 I_s 上每个顶点和重心 O_s 的偏移量 $I_s^i - O_s$,计算协方差矩阵 Cov :

$$Cov = \sum_{i=1}^n (I_s^i - O_s)(I_s^i - O_s)^T \quad (5)$$

其中, n 为 I_s 中顶点的个数, T 表示转置。求解 Cov 的特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ 以及对应的特征向量 v_1, v_2, v_3 ,一般情况下,局部区域的垂直方向具有最少的点,所以,将 v_3 近似作为 p 点的法线方向。

2 三维点云上两点之间的测地距离

三维点云上两点之间的测地距离相当于图论中两点之间的最短路径,图论中一个无向图每两个节点之间都有一个权重,往往借鉴一些算法,可以得到2个节点之间的最短路径^[19]。为求得三维点云上任意两点之间的最短路径,这里采用了三维数据中初始权重矩阵 ω 的求法, $\omega(i,j)$ 表示第 i 个顶点和第 j 个顶点的初始测地距离;如果第 i 个顶点和第 j 个顶点在同一个面片上,则 $\omega(i,j)$ 的值为 i 个顶点和第 j 个顶点的欧氏距离,如果第 i 个顶点和第 j 个顶点不在同一个面片上,则令 $\omega(i,j)$ 的值为 inf 。这样就得到了三维点云中任意两点之间的初始测地距离,利用加速 Dijkstra 算法^[20],不断地更新 $\omega(i,j)$,就可以获得任意两点之间的测地距离。设 P_0 为鼻尖点,计算鼻尖点到所有点的最短测地距离的步骤如下:

步骤1 令 $Q = \{\text{其余顶点}\} = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$, $P = \{P_0\}$, ω 为 P_0 与其余顶点构成的权重矩阵。

步骤2 从 Q 选择一个与 P_0 在同一个面片上且权重最小的顶点放入 P 中,设 P 变化后的集合为 $P' = \{P_0, P_1\}$, Q 变化后的集合 $Q_1 = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_{n-1}\}$ 。

步骤3 更新 P_0 和 Q_1 中点的权重,若当前 P_0 和 Q_1 中一点 Q_k 的权重大于 P_0 和 P_1 的权重与 P_1 和 Q_k 的权重之和 $g(P_0, P_1) + g(P_1, Q_k)$,则将 P_0 和 Q_k 的权重更新为 $g(P_0, P_1) + g(P_1, Q_k)$ 。

步骤4 重复步骤2和步骤3,直到 P 中包含所有的点,可以得到鼻尖点和所有点的最短测地距离。

3 迭代最近点匹配矫正

对经过粗略矫正和去噪的三维人脸数据,利用迭代最近点(Iterative Closest Point, ICP)算法可以精确配准并得到匹配误差。设2个点集 $\{p_1, p_2, \dots, p_i\}$ 和 $\{p'_1, p'_2, \dots, p'_i\}$, $\{p_1, p_2, \dots, p_i\}$ 为要进行变换的点集, $\{p'_1, p'_2, \dots, p'_i\}$ 为目标点集, ICP算法的目的就是要找到一个旋转矩阵 R 和一个平移向量 T 满足:

$$p'_i \approx R p_i + T \quad (6)$$

ICP配准的具体步骤如下:

步骤1 计算点集 $\{p_1, p_2, \dots, p_i\}$ 和 $\{p'_1, p'_2, \dots, p'_i\}$ 的重心:

$$p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i, p' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p'_i \quad (7)$$

步骤2 计算点集 $\{p_1, p_2, \dots, p_i\}$ 和 $\{p'_1, p'_2, \dots, p'_i\}$ 分别对 p 和 p' 的偏移量:

$$q_i = p_i - p, q'_i = p'_i - p' \quad (8)$$

步骤3 计算 3×3 矩阵:

$$H = \sum_{i=1}^N q_i q'_i{}^T \quad (9)$$

步骤4 对矩阵 H 进行SVD值分解:

$$H = U \Lambda V^T \quad (10)$$

步骤5 令 $X = UV^T$, 计算 X 的行列式的值, 如果行列式的值等于1, 则:

$$R = X, T = p' - R p \quad (11)$$

如果行列式的值为-1, 则算法失效。令变换后的点集为 $\{p'_1, p'_2, \dots, p'_i\}$, 对于 $\{p'_1, p'_2, \dots, p'_i\}$ 中的每一个点 p'_k , 在 $\{p'_1, p'_2, \dots, p'_i\}$ 中找和它最近的点 y_k , 计算 $\{p'_1, p'_2, \dots, p'_i\}$ 和 $\{p'_1, p'_2, \dots, p'_i\}$ 的匹配误差:

$$E^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|p'_i - y_i\|^2 \quad (12)$$

比较 E 和给定阈值 Th 的大小, 如果 $E > Th$, 重复上述步骤直到 $E \leq Th$, 停止运算, 这就完成了整个匹配矫正的过程, 在迭代的过程中, 如果点云数据庞大时会比较耗时, 可以采用kd-tree加速运算过程^[15]。

4 算法流程

三维人脸鼻尖点检测与姿态矫正的过程如下: 首先将三维人脸数据分为训练集和测试集, 通过有效能量对测试集进行第一次筛选, 确定鼻尖点候选点, 对一些手工标记鼻尖点的训练集, 计算鼻尖点上有效能量的均值和方差, 经过训练得到分类器, 用分类器对上面得到的候选点进行分类, 进一步减少候选点的个数, 利用点密度确定最终鼻尖点(如图3所示); 然后计算鼻尖点到其他点的测地距离, 提取测地距离小于 r 的点为切割出的有效轮廓, 利用主成分分析完成姿态粗略矫正; 最后采用kd-tree加速的ICP算法进行精确矫正, 得到匹配误差。

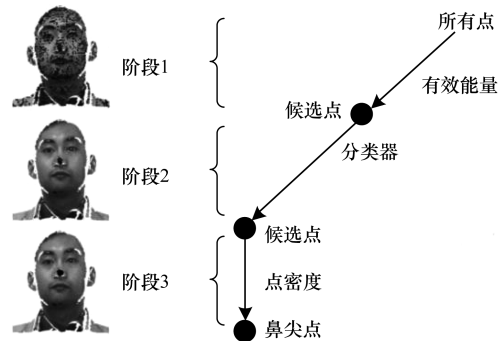


图3 鼻尖点筛选过程

本文算法的具体步骤如下:

步骤1 Matlab读取三维点云数据, 设顶点集合为 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 。

步骤2 计算每个定点的法向量, 记法向量集合为 $\{N_1, N_2, \dots, N_n\}$ 。

步骤3 取三维点云上任意一点 p , p 的 r 邻域的点称为 p 的相邻点,对相邻点中的 p_i 计算有效能量 d_i ,如果相邻点中的所有 d_i 均为负数,选取 p 点作为鼻尖点候选点,否则不做处理。

步骤4 继续计算下一个点的相邻点的有效能量,直到遍历完所有点,就完成了初步筛选,设初步筛选的鼻尖候选点为 $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 。

步骤5 对一些手工标记鼻尖点的训练集,计算鼻尖点的相邻点的有效能量的均值和方差,经过训练得到分类器,用分类器对上面得到的候选点进行进一步得到减少后的候选点 $\{c_1, c_2, \dots, c_{k_1}\}$ ($k_1 < k$)。

步骤6 对候选点中的任意一点,计算其 r_1 邻域包含候选点的个数,选择包含候选点最多的那个点为最终确定的鼻尖点。

步骤7 计算鼻尖点到其他点的测地距离,用测地距离为 r 的等测地线来切割人脸,获得有效的人脸轮廓 F_s 。

步骤8 记有效轮廓 F_s 的重心为 O_s ,计算 F_s 上每个顶点和重心 O_s 的偏移量 $F_s(i) - O_s$,计算协方差矩阵:

$$Cov = \sum_{i=1}^{M_i} (F_s(i) - O_s)(F_s(i) - O_s)^T \quad (13)$$

其中, M_i 为 F_s 中顶点的个数, T 表示转置。求解 Cov 的特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ 以及对应的特征向量 v_1, v_2, v_3 ,利用 $[v_1, v_2, v_3] F_s(i)$ 完成对人脸的粗略矫正。

步骤9 采用ICP算法完成标准姿态的精确矫正。

5 实验与结果分析

实验所用仿真软件为Matlab 2014a,实验数据为中科院采集的CASIA3D数据库以及BU-3DFE数据库,CASIA3D数据库包含123个人,共4 624个3维模型,其中每个人包含不同光照、不同表情、不同姿态的多个数据,BU-3DFE数据库包含100个人总共700个三维模型。实验中每个人选取3个作为训练集,即669个作为训练集,剩下的为测试集合。实验通过2个部分完成:鼻尖点检测部分和姿态矫正部分。

5.1 鼻尖点检测实验

首先对测试集中的每个模型通过有效能量确定鼻尖点候选点;然后利用训练集得到的分类器对候选点进一步筛选,得到减少后的鼻尖候选点;最后通过点密度确定最终的鼻尖点。图4展示了部分实验

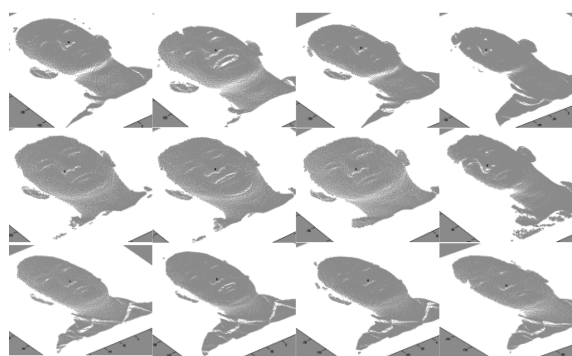
结果,分别显示了原始模型、Matlab读入数据和鼻尖点定位结果。包括3个人(前两个人是CASIA3D数据库中的模型,后面一个人是BU-3DFE数据库中的模型)的正面、大笑、左侧30°、右侧30°的鼻尖点定位效果。



(a)3个人4种不同姿态的原始模型



(b)Matlab读入数据



(c)鼻尖点定位结果

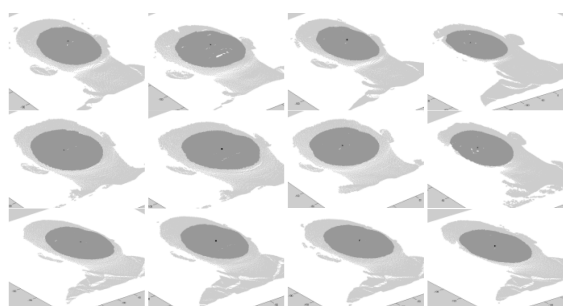
图4 鼻尖点检测实验结果

从图4(a)和图4(b)中可以看出,等测地线提取到了有效图的人脸轮廓,在图4(c)中,通过主成分分析得到3个相互垂直的方向,这3个方向分别是基于人脸上下、人脸左右和人脸前后的3个方向。

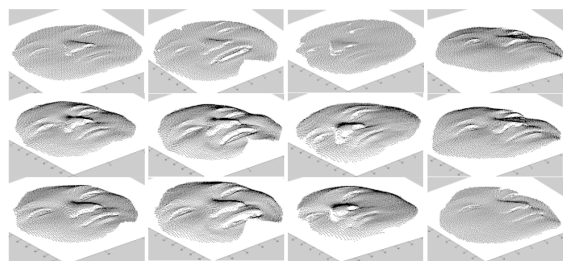
5.2 姿态矫正实验

计算鼻尖点到其他点的测地距离,利用到鼻尖点的固定测地距离得到的测地线去切割有效的人脸区域,对切割后的人脸区域采用主成分分析,得到

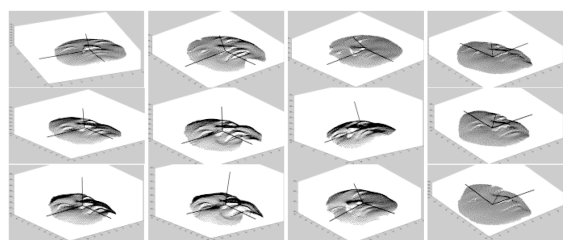
3 个相互垂直的方向,利用 3 个相互垂直的方向建立姿势坐标系,完成测试集的粗略矫正,最后对每一个人,以第一个模型为标准,将其他的模型与第一个对齐。图 5 分别显示了需要切割的人脸区域、切割出的人脸区域、主成分分析得到的 3 个相互垂直的方向、姿态粗略矫正和 ICP 对齐结果。



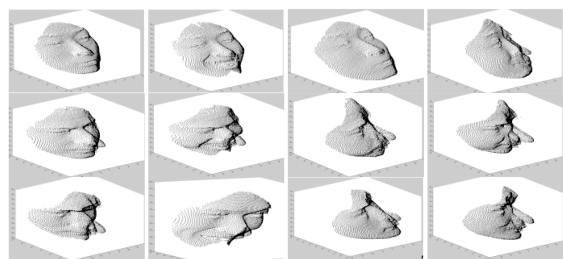
(a)需要切割的人脸区域



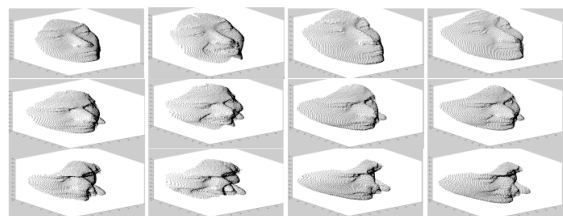
(b)切割出的人脸区域



(c)主成分分析得到的3个相互垂直的方向



(d)姿态粗略矫正结果



(e)ICP精确对齐结果

图 5 人脸切割与姿态矫正结果

从图 5(d)中可以看出,利用这三个方向得到了较好的近似效果,图 5(e)是采用 kd-tree 加速的 ICP 算法,将每个人的其他人脸与第一个标准人脸对齐的结果,从结果来看,对齐效果较好。

在鼻尖点定位部分,计算所有定位结果与真实鼻尖点的测地距离,如果测地距离小于 r (r 的取值要依据数据库数据的点密度而定,本文中 r 取 5.6),认为定位成功,否则,认为定位失败。在姿态矫正部分,计算所有矫正姿态与正面姿态的匹配误差,如果匹配误差小于 r_1 (本文中 r_1 取 1.887 9),认为矫正成功,否则认为矫正失败。

5.3 对比实验

为了验证本文算法的效果,将其与文献[10,21-22]算法进行了对比,图 6 为 3 886 个三维人脸在这 3 种算法和本文算法下的鼻尖点定位统计图,其中横坐标代表三维人脸序号,纵坐标代表定位误差,圆点(下半部)代表定位成功,星点(上半部)代表定位失败。图 7 为 3 886 个三维人脸在文献[10,21-22]算法和本文算法下的姿态矫正统计图,横坐标代表三维人脸序号,纵坐标代表姿态矫正误差,圆点(下半部)代表矫正成功,星点(上半部)代表矫正失败。

从图 6 鼻尖点定位结果中可以看出,文献[10]算法中的星点(上半部)比文献[21]和文献[22]的星点稀疏,本文方法中的星点是最稀疏的,而星点(上半部)越稀疏代表鼻尖点定位效果越好。

从图 7 姿态矫正结果中可以看出,本文方法的星点(上半部)比文献[10,21-22]方法都稀疏,星点(上半部)越稀疏代表姿态矫正效果越好。

本文算法的执行过程实际上分为线下训练和线上应用 2 个阶段。第一阶段需要对大量的三维数据进行手工标记鼻尖点,通过计算训练得到鼻尖点的特征分布,但是这些结果一旦得到,将作为一种分类准则应用,不再产生额外的耗时;第二阶段则是线上实际的耗时。

4 种算法的鼻尖点检测与姿态矫正成功率比较如表 1 所示,其中运行时间是指线上应用的耗时,不包含线下训练的时间。

从表 1 中可以看出,本文算法的鼻尖点检测成功率和姿态矫正的成功率分别达到了 98.8% 和 98.3%,比其他 3 种算法均有明显的提高。另外,对于输入的三维数据,本文算法的鼻尖点定位和姿态矫正的执行耗时仅为 1.489 8 s,也明显高于其他算法,验证了本文算法的有效性。

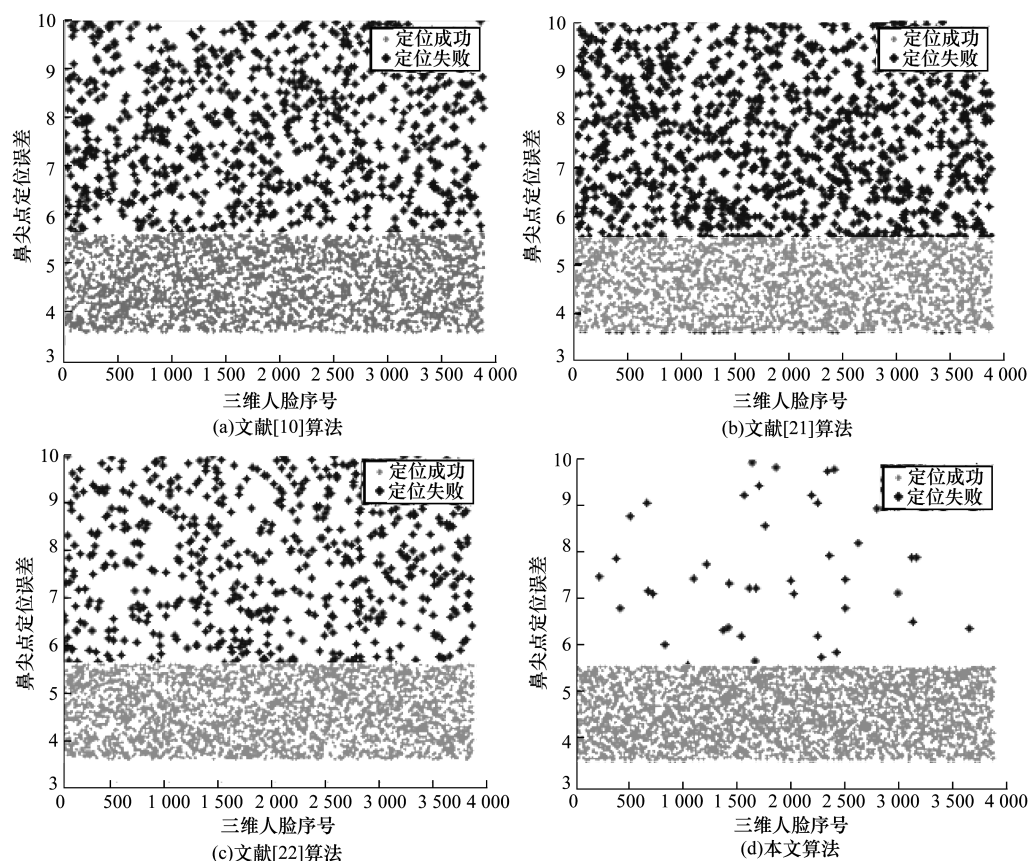


图6 鼻尖点定位结果比较

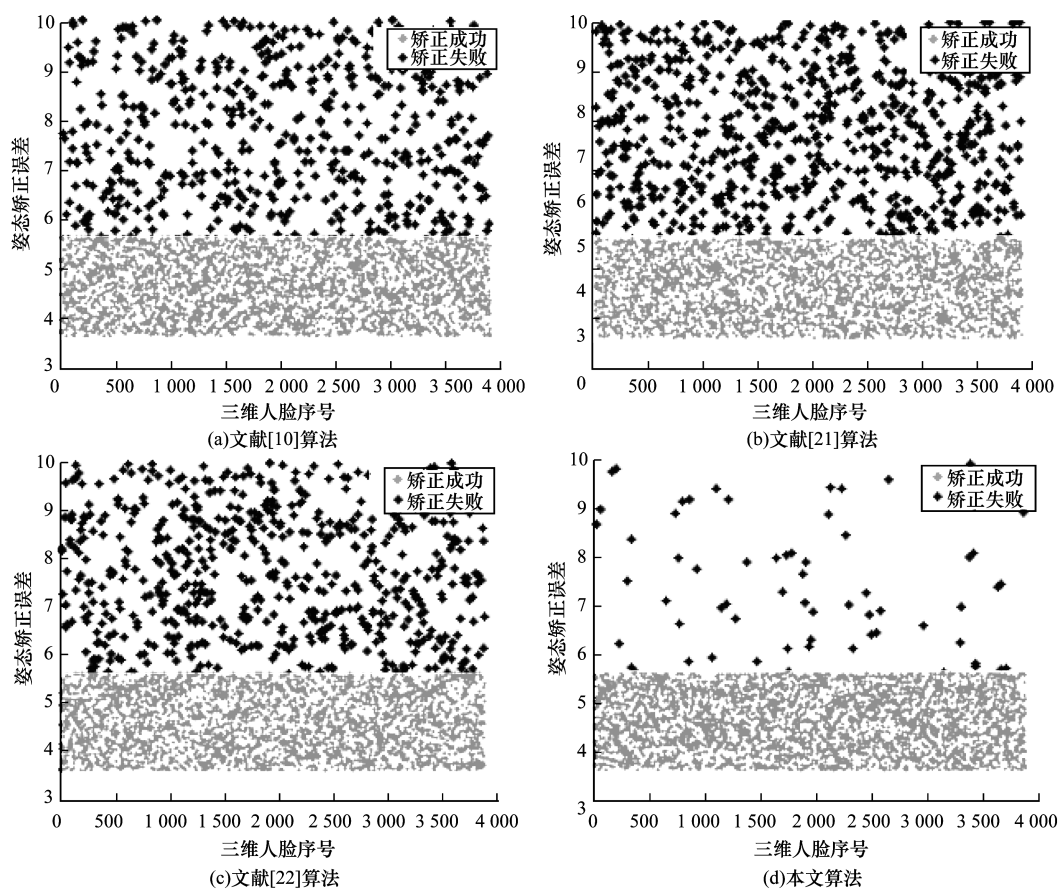


图7 姿态矫正结果比较

表 1 检测性能比较

算法	鼻尖点检测成功率/%	矫正成功率/%	运行时间/s
文献[10]算法	84.7	84.5	2.489 4
文献[21]算法	82.6	86.1	5.877 5
文献[22]算法	71.9	80.4	4.841 5
本文算法	98.8	98.3	1.489 8

6 结束语

本文提出一种基于有效能量的三维人脸鼻尖点检测与姿态对齐算法。首先采用能够判断曲面凹凸性的有效能量确定鼻尖点候选点;然后根据训练得到的分类器与点密度得到最终鼻尖点;最后利用测地线切割有效人脸轮廓,通过主成分分析粗略矫正,并通过 kd-tree 加速的 ICP 算法实现精确对齐。仿真实验结果表明,本文算法取得了较好的鼻尖点检测和姿态矫正效果,运算效率也较其他算法具有明显优势。鼻尖点定位的准确性受训练样本库容量的制约,预处理算法的鲁棒性也会对结果产生影响。因此,下一步将在增加训练样本的差异性和容量的同时,研究三维人脸的去噪和补洞等图像增强算法,使算法在人脸被遮挡及姿态变化的情况下仍然可以快速准确检测和定位鼻尖点。

参考文献

- [1] YANG M, ZHU P, LIU F, et al. Joint representation and pattern learning for robust face recognition [J]. Neurocomputing, 2015, 168(C): 70-80.
- [2] SHARMA R, PATTERH M S. A new pose invariant face recognition system using PCA and ANFIS [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(23): 3483-3487.
- [3] 程晓雅, 王春红. 基于特征化字典的低秩表示人脸识别[J]. 计算机应用, 2016, 36(12): 3423-3428.
- [4] 徐俊, 达飞鹏. 一种基于局部描述符的三维人脸识别方法[J]. 模式识别与人工智能, 2012, 25(1): 45-53.
- [5] PENG W, XU C, FENG Z. 3D face modeling based on structure optimization and surface reconstruction with B-Spline [J]. Neurocomputing, 2016, 179(12): 228-237.
- [6] 刘佳, 傅卫平, 王雯, 等. 基于改进 SIFT 算法的图像匹配[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 1107-1112.

- [7] 冯思宇, 雷印杰, 周新志. 针对单样本人脸的三维部分人脸识别[J]. 计算机工程, 2016, 42(9): 144-150.
- [8] 邹红艳, 达飞鹏. 基于轮廓线局部描述符的三维人脸识别[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(5): 1561-1563.
- [9] 魏明俊, 许道云, 徐梦珂. 基于均方差度量分块的自动加权稀疏表示算法[J]. 计算机工程, 2017, 43(5): 174-178.
- [10] 刘丹, 童卫青. 基于鼻子下轮廓线的鼻尖定位法[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2014(4): 54-61.
- [11] 邓星, 达飞鹏, 杨乔生. 基于自适应人脸切割的三维人脸识别算法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(2): 260-264.
- [12] XU C, TAN T, WANG Y, et al. Combining local features for robust nose location in 3D facial data[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(13): 1487-1494.
- [13] 陈强, 田杰, 黄海宁, 等. 基于统计和纹理特征的特征的 SAS 图像 SVM 分割研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 1413-1420.
- [14] ZLATANOVIC M, HINTERLEITNER I, NAJDANOVI C M. Geodesic mapping onto Kählerian spaces of the first kind[J]. Czechoslovak Mathematical Journal, 2014, 64(4): 1113-1122.
- [15] 郭迪, 周明全, 王学松, 等. 基于测地距离三维模型瑕疵外观模拟[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(9): 1984-1987, 1996.
- [16] 陈芙蓉, 唐棣, 王露晨, 等. 基于动态路径优化的人体姿态识别[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(10): 2759-2763.
- [17] 朱立才, 王汝传, 杨浩, 等. 一种能量有效的 RPL 多路径数据分发机制[J]. 北京邮电大学学报, 2016, 39(6): 82-87.
- [18] 甄岩, 许稳, 王汝言, 等. 间断连接无线网络中能量有效的数据转发策略[J]. 工程科学学报, 2016, 38(10): 1489-1498.
- [19] 刘霖雨, 龚敬, 聂生东. 利用测地线距离直方图分割血管粘连型肺结节的算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(3): 493-500.
- [20] 范炯, 朱志宇. 基于 MapInfo 的 Dijkstra 最短路径算法研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2017, 31(1): 79-83.
- [21] 张晓博, 潘纲, 任豪毅, 等. 实时三维人脸特征点定位[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(9): 1325-1337.
- [22] 潘仁林, 达飞鹏, 邹红艳, 等. 基于面部曲线弹性匹配的三维人脸识别方法[J]. 图学学报, 2014, 35(3): 358-367.

编辑 金胡考