

基于单幅正面照片的三维人脸重建方法

邓秋平, 赵宇明

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘 要: 三维人脸重建算法需要多张照片实现重建且重建效率低下。针对上述问题, 提出一种利用单幅正面照片重建三维人脸的方法。采用薄板样条函数对数据库中的三维人脸确立点对点的对应关系, 建立平均三维人脸模型, 利用 LMA 算法优化形状系数以恢复其三维形状, 人脸颜色纹理信息可通过垂直投影得到。实验结果表明, 利用该方法重建得到的三维人脸逼真且时间效率高。

关键词: 三维人脸重建; 三维人脸建模; 薄板样条函数; 点对点对应; 主成分分析

3D Face Reconstruction Method Based on Single Frontal Photo

DENG Qiu-ping, ZHAO Yu-ming

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

【Abstract】 3D face reconstruction algorithms require more than one image to realize reconstruction and their efficiency is low. Aiming at the problems, this paper proposes a 3D face reconstruction algorithm based on single frontal photo. It uses Thin Plate Spline(TPS) function to build 3D face model by establishing the point-to-point correspondence among 3D faces in the database, so that an average 3D face model is built. It uses Levenberg-Marquardt Algorithm(LMA) to optimize the shape coefficients. The input image is projected orthogonally to the 3D shape to generate the face texture. Experimental results show that the method can generate realistic 3D faces efficiently.

【Key words】 3D face reconstruction; 3D face modeling; Thin Plate Spline(TPS) function; point-to-point correspondence; Principal Components Analysis(PCA)

1 概述

近年来, 三维人脸建模和重建技术在计算机视觉和计算机图形学领域受到越来越多的关注。在过去的几十年中, 很多学者提出了如何由二维图像重建三维形状的算法。但是大多数算法都需要多张图像或者需要视频来初始化三维人脸重建过程, 而在很多应用场合下, 只有一张图像可供使用; 有的方法虽然只用单张图片进行三维人脸重建, 但得到的三维人脸不够逼真^[1]。因此, 需要一种能由单张图像重建逼真的三维人脸的算法。一些学者提出了较为精确的三维人脸算法, 其中最成功的当属由文献[2-3]提出的基于三维形变模型(3D Morphable Model, 3DMM)、通过合成分析和对多元代价函数进行随机最优化来重建三维人脸模型的算法。为了提高人脸特征拟合的精确度, 首先对人脸整体进行拟合, 然后对特定区域进行拟合, 如眼睛、嘴巴和鼻子。整个拟合过程大约用时 4.5 min, 很显然, 由于用时较长, 该系统难以付诸实际应用。在三维形变模型的基础上, 文献[4]提出了一种高效、鲁棒和精确的拟合算法——反向合成图像对齐(Inverse Compositional Image Alignment, ICIA)算法来拟合二维图像。这种方法极大地改善了拟合效率。文献[5]提出了一种线性形状和纹理拟合算法。这种算法与 ICIA 类似, 其速度比随机最优化算法快 5 倍。文献[6]提出了一种结合 2D 到 3D 的高效的人脸重建方法, 由单张正面人脸照片重建三维人脸模型, 要求输入的人脸照片只有一般表情和正常光照, 根据个性化的 3D 人脸, 就能得到在不同 PIE(姿态、光照和表情)下的逼真的虚拟人脸。

本文在文献[2,6]的基础上提出了一种新的基于单幅正面照片的三维人脸重建系统。采用薄板样条(Thin Plate Spline,

TPS)函数确立三维人脸的对应关系, 以建立三维人脸模型并利用 LMA(Levenberg-Marquardt Algorithm)^[7]优化形状系数。同时在此过程中, 利用人脸的垂直投影得到其纹理颜色信息, 使得人脸重建的速度更快, 也更方便。

2 三维人脸数据库及数据处理

本文采用的数据库是由北京工业大学多媒体与智能软件技术实验室创建的 BJUT-3D 大型中国人人脸数据库^[8]。该数据库现有 500 个中国人三维人脸, 男女各占一半, 这些数据都是在特定的条件下用 CyberWare 3030RGB/PS 激光扫描仪记录得到的。扫描得到的原始数据需进行预处理, 包括平滑处理、移除毛刺、填充空洞(缺失的数据)以及坐标矫正等。另外还要将头发部分和肩膀以下部分移除, 最后得到的三维人脸见文献[8]。

3 基于 TPS 的三维人脸建模

利用统计信息重建基于单张照片的三维人脸, 其中一个很重要的步骤就是建立通用的三维人脸模型, 即平均三维人脸模型。这个人脸模型是根据数据库中的三维人脸建立的。为了建立三维模型, 需要找到人脸库中所有人脸之间的点对点的对应关系。近年来有不少确立三维人脸对应关系的算法, 主要分为 2 类: (1)将三维笛卡尔坐标转换到二维的圆柱坐标下, 利用人脸对齐或者图像配准算法来确立二维图像的对应关系, 再将已确立对应关系的二维坐标转换到三维下^[2-3]。这种方法较为方便, 但精确度不高。(2)在三维人脸脸上利用变形算法来确立对应关系, 如文献[9]利用了薄板样条函数。这种

作者简介: 邓秋平(1985-), 男, 硕士研究生, 主研方向: 图像处理, 三维重建, 人脸识别; 赵宇明, 副教授、博士

收稿日期: 2010-03-07 **E-mail:** cbtogu@hotmail.com

方法较精确,但是计算复杂,耗时长。本文结合 2 种方法的优点,提出一种新的确立点与点对应关系的方法,即利用 TPS 算法确立二维圆柱坐标系下的对应关系,再将二维坐标转换到三维笛卡尔坐标系。这种方法的优点在于速度快且能得到较高的精确度。方法的具体步骤如下:

(1)将三维笛卡尔坐标系转换到圆柱坐标系下

为了能在二维上进行 TPS 变换,要将笛卡尔坐标系下的三维数据点转换到圆柱坐标系下。

(2)调整图像大小

选择其中一张人脸较为端正的二维图像作为参考图像,将其他所有图像的大小调整得与此参考图像大小一致。

(3)利用 TPS 确立对应关系

建立人脸模型最核心的步骤是确立一般人脸与参考人脸间点对点的对应关系^[2-3]。如果人脸在圆柱坐标展开图下的差异性较小,其对应关系可用光流算法自动且简单地确立^[2]。然而由于种种原因,数据库中的很多人脸看起来差异很大,因此一些自动的对齐算法很难获得较好的效果。

TPS 算法^[10]最初用于解决图形间的变形问题。本文利用 TPS 来确立图像间的对应关系。首先,在所有圆柱坐标系下的人脸展开图中手工标记 41 个控制点,这些点包括一些重要的特征点(如眼角、鼻子、嘴角)以及一些重要的边界点,以防止错误的变形。这样,利用 TPS 方程就能得到每个人脸与参考人脸间的稠密点对点对应关系。

(4)建立平均人脸模型

在所有训练样本都确立点对点对应关系后,就可以建立平均人脸模型。在这之前需要定义人脸向量,其中包括形状向量和纹理向量,然后利用 PCA 提取出形状特征向量和纹理特征向量。因此,平均人脸模型包括了平均形状向量和平均纹理向量以及它们对应的特征向量。在平均人脸模型的建立过程中,使用了三维人脸库中的 200 个人脸(100 个男性和 100 个女性)作为样本。

形状向量和纹理向量的定义是基于三维参考人脸的。本文选择的三维参考人脸是由 72 579 个顶点组成的三角形网格。让网格中的第 $k(k \in \{1, 2, \dots, n\})$ 个顶点在圆柱坐标系下的坐标为 (r_k, θ_k, h_k) ,在笛卡尔坐标系下的坐标为 (x_k, y_k, z_k) ,对应的纹理颜色值为 (R_k, G_k, B_k) ,这样,参考人脸的形状向量和纹理向量分别定义如下:

$$S_0 = (x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_n, y_n, z_n)^T \quad (1)$$

$$T_0 = (R_1, G_1, B_1, R_2, G_2, B_2, \dots, R_n, G_n, B_n)^T \quad (2)$$

每个人脸都用同样的方式来表示,得到的平均人脸模型如图 1 所示。

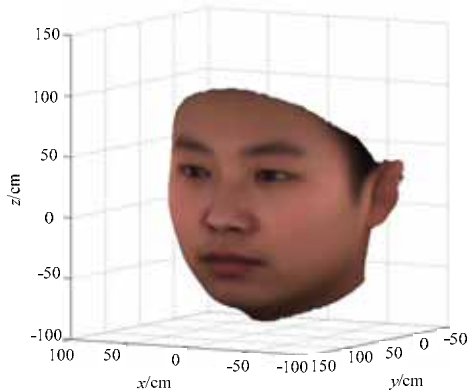


图 1 平均人脸模型

主成分分析(Principal Components Analysis, PCA)法是一种简单的非参数化的分析方法,它在各种分析中被广泛使用。本文采用的 PCA 分析方法类似于文献[3]的方法,改变形状系数和纹理系数就能得到不同的三维人脸,这些人脸有可能是原数据库中不存在的。

4 基于单幅图像的三维人脸重建

由于现有的很多三维人脸重建系统因存在低效等缺陷而难以用于实时应用,因此需要一种更加高效的重建算法。本文的三维人脸重建方法只需要一张正面照片来初始化三维重建过程,然后利用 LMA^[7]恢复其三维形状。人脸纹理直接通过垂直投影得到,过程类似于文献[6]的方法。

4.1 三维形状恢复

一般来说,从单张二维图像重建三维人脸是一个病态问题^[2]。本文方法要求输入的是正面姿态、一般表情和正常光照下拍摄的二维人脸照片,这种拍摄条件是在一般应用,包括人脸识别中最常用的拍摄条件。在二维人脸和三维模型上选择 16 个点来估计二维人脸与三维模型间的仿射变换,从而初始化三维重建过程。之后就可以利用 LMA 估计出形状系数 α_i 。

一个新的人脸形状可表示为:

$$S' = \bar{s} + Pa \quad (3)$$

其中, \bar{s} 是平均模型; $P \in R^{3n \times m}$ 是前 m 个特征向量组成的特征矩阵; $a = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \in R^m$ 为形状系数向量。

对齐时,要从正面的三维人脸模型和二维人脸图像中选择 t (这里 $t=16$) 个特征点。用 $S_f = (x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_t, y_t)^T \in R^{2t}$ 表示这些特征点的 x, y 坐标集合,这样, S_f 可认为是 S' 的子形状向量。根据式(2),新的形状 S_f' 上这些特征点的 x, y 坐标可表示成:

$$S_f' = \bar{s}_f + P_f a \quad (4)$$

其中, $\bar{s}_f = (\bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{x}_2, \bar{y}_2, \dots, \bar{x}_t, \bar{y}_t) \in R^{2t}$ 和 $P_f \in R^{2t \times m}$ 分别是式(3)中 \bar{s} 和 P 的二维表示。估计出仿射变换后,假设三维人脸模型的正面投影到二维平面上,得到二维坐标 $\bar{s}_f(x, y)$,输入的二维人脸图像的坐标为 $input_cor(x, y)$,则估计得到的输入人脸图像假设为:

$$S_f'(x, y) = \bar{s}_f(x, y) + P_f \cdot a \quad (5)$$

目标就是最小化代价函数:

$$E = \sum_{x,y} \|input_cor(x, y) - S_f'(x, y)\| \quad (6)$$

使得估计的二维坐标尽量与输入的二维坐标接近。这里利用 LMA^[7]来优化形状系数 α 。得到 α 后,根据式(2)就能得到新的形状向量 S' 。

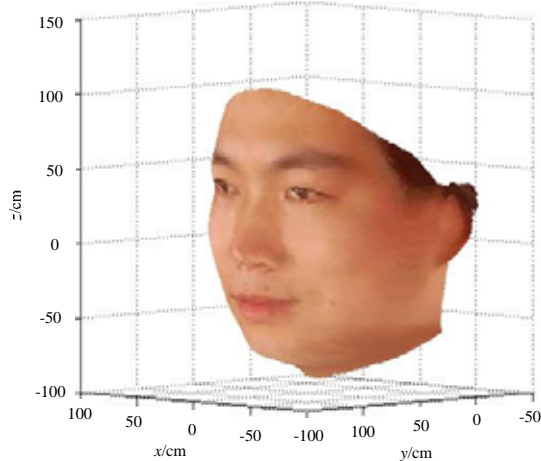
4.2 纹理恢复

本文方法将输入图像垂直投影到三维形状上,由此得到人脸纹理^[6]。与文献[2-3]的方法相比,这种纹理提取方法是实时的,其纹理有比较丰富和真实的特征,这在应用中很重要。

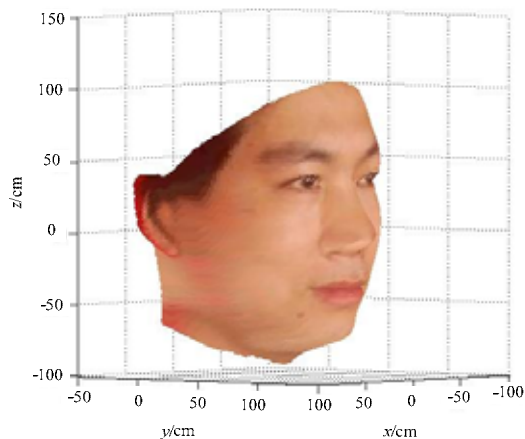
在第 3 节的三维形状重建中提到,要先进行人脸对齐然后进行重建过程。在对齐过程中同时记录下每一个点的颜色值,这样,形状和纹理之间的一一对应关系就能保留下来,在绘制三维形状的同时将纹理贴上,就能得到既有形状又有纹理的三维重建人脸了。其中一个三维重建的例子如图 2 所示。限于篇幅,这里仅给出 2 个视角下的重建结果。



(a)输入照片



(b)三维人脸的右视图



(c)三维人脸的左视图

图2 三维重建示例

4.3 时间效率

为了测试三维人脸重建的效率, 比较了优化形状系数和提取人脸纹理的时间。用 Matlab 测试了 20 个样本, 其重建时间为 3 s~5 s, 平均时间大约为 4 s。表 1 给出了 4 种方法的重建时间对比。

表 1 4 种方法的重建时间对比

3D 人脸重建方法	计算机配置	重建时间
文献[2]方法	2 GHz P4 CPU 的工作站	约 4.5 min
文献[4]方法	2.8 GHz P4 CPU C 实现	平均 30 s
文献[6]方法	1.3 GHz P4 CPU	约 5 s
本文方法	奔腾双核 1.6 GHz PC Matlab	平均约 4 s

从表 1 中可以看出, 与文献[2,4,6]的方法相比, 本方法由于在三维形状恢复时利用特征点进行粗对齐, 且在纹理恢复中采用了垂直投影的方法, 因此减少了整个三维重建的时间。

5 结束语

三维人脸重建是人脸动画和基于三维人脸的人脸识别算法的基础性工作, 也是关键的一环。本文提出一种利用单幅正面照片重建三维人脸的方法, 其包括两大步骤:

(1)利用 TPS 算法建立三维人脸库的统计三维人脸模型。

(2)根据输入照片与平均人脸模型的坐标对应关系, 恢复输入照片的三维形状和纹理信息。

实验结果表明, 本文方法重建得到的三维人脸较为逼真, 时间效率较高。将来主要从逼真程度、算法自动化程度以及解决光照、姿态和表情等方面着手, 使该方法在实际场合中得到更有效的应用。

参考文献

- [1] Zhang Ruo, Tsai Ping-Sing, James E C, et al. Shape from Shading: A Survey[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(8): 690-706.
- [2] Blanz V, Vetter T. A Morphable Model for the Synthesis of 3D Faces[C]//Proc. of SIGGRAPH'99. Los Angeles, USA: ACM Press, 1999.
- [3] Blanz V, Vetter T. Face Recognition Based on Fitting a 3D Morphable Model[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(9): 1063-1074.
- [4] Romdhani S, Vetter T. Efficient, Robust and Accurate Fitting of a 3D Morphable Model[C]//Proc. of the 9th IEEE International Conference on Computer Vision. Nice, France: IEEE Computer Society, 2003.
- [5] Romdhani S, Blanz V, Vetter T. Face Identification by Fitting a 3D Morphable Model Using Linear Shape and Texture Error Functions[C]//Proc. of ECCV'02. London, UK: Springer-Verlag, 2002: 3-19.
- [6] Jiang Dalong, Hu Yuxiao, Yan Shuicheng, et al. Efficient 3D Reconstruction for Face Recognition[J]. Pattern Recognition, 2005, 38(6): 787-798.
- [7] Madsen K, Nielsen H B, Tinglef O. Methods for Non-linear Least Squares Problems[J/OL]. [2009-11-20]. www2.imm.dtu.dk/pubdb/views/edoc_download.php/3215/pdf/imm3215.pdf.
- [8] Chinese Face Database[DB/OL]. [2009-12-10]. <http://www.bjpu.edu.cn/sci/multimedia/mul-lab/3dface/facedatabase.htm>.
- [9] Guo Hui, Jiang Jiayan, Zhang Liming. Building a 3D Morphable Face Model by Using Thin Plate Splines for Face Reconstruction[C]//Proc. of Advances in Biometric Person Authentication. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2004.
- [10] Bookstein F L. Principle Warps: Thin Plate Spline and the Decomposition of Deformation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(6): 567-585.

编辑 张 帆