

文章编号: 1005-5630(2015)05-0397-05

# 一种基于 NL-SFS 方法的三维人脸快速重建系统

王国琿, 周睿哲, 郑浩杰

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 针对快速重建三维人脸的需求, 设计了一种基于非 Lambert 从明暗恢复形状 (NL-SFS) 方法的三维人脸快速重建系统。首先人脸表面采用非 Lambert 反射模型描述其反射特性, 这更接近于人脸表面实际的反射特性; 接着由遵循正交投影的摄像机获取光源作用下的人脸表面图像, 同时假定摄像机方向与光源方向保持一致, 建立人脸表面的图像辐照度方程; 然后将该方程转化为包含人脸表面深度信息的 Eikonal 方程; 最后根据上述方程的特点, 利用 fast marching 方法设计了系统软件, 能够快速求得 Eikonal 方程的解, 进而重建出人脸的三维形状。实验结果表明, 该系统可以在较短的时间内获得较高的重建精度, 即 0.9 s 内可达到 0.43% 的高度平均相对误差。

**关键词:** NL-SFS 方法; 三维人脸重建; Eikonal 方程; fast marching 方法

**中图分类号:** TP 391 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.05.005

## A fast recovery system of 3D face based on NL-SFS approach

WANG Guohui, ZHOU Ruizhe, ZHENG Haojie

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Due to the demand of fast recovery of 3D face, a recovery system based on non-Lambertian shape from shading (NL-SFS) approach was designed. Firstly, the non-Lambertian reflectance model was used to characterize the face, which was very closed to the actual reflectance property. Then, under a light source the face image was acquired by a camera whose projection mode was orthographic. The image irradiance equation for the face was derived under the assumption that the direction of the camera was the same as the light source. Furthermore, the equation was formulated into an Eikonal equation which included the shape of the face. Lastly, according to its characteristic, the system software was developed by using the fast marching method. The software can compute the solution of the equation, and then the 3D shape of the face was obtained. Experimental results demonstrated that the designed system could fastly achieve high recovery accuracy, which is 0.43% mean relative error within 0.9 s.

**Keywords:** NL-SFS approach; 3D face recovery; Eikonal equation; fast marching method

**收稿日期:** 2015-04-22

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61102144); 教育部科学技术研究重点项目资助(212176); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2011JQ8004); 西安工业大学大学生创新专项经费资助项目(201310702005)

**作者简介:** 王国琿(1980—), 男, 副教授, 博士, 主要从事视觉测量技术、图像理解、光电测试技术等方向的研究。E-mail: wangguohui95@163.com

**通信作者:** 周睿哲(1991—), 男, 本科生, 主要从事视觉测量技术、光电测试技术等方向的研究。E-mail: zhuxixiang22@163.com

### 引 言

面部是人们在相互交往中最惹人注目的部位,因而成了情感表达与身份识别最重要的载体。随着计算机技术的发展,人脸的三维造型已经成为模式识别技术和计算机图形学一个重要的研究领域。在人脸识别时,利用三维造型可以降低人脸表情、姿态、光照变化等影响,大大提高识别率。在人机交互、影视动画、游戏娱乐等场合也大量运用到三维造型技术。一般来讲,对物体表面形状的三维重建,通常有基于几何信息和基于光度信息两类方法。基于几何信息的方法,往往涉及到图像传感器的标定、特征提取、立体匹配等,计算过程较为复杂,从而重建时间较长。而基于光度信息的方法,仅仅利用图像的灰度信息来重建物体表面的三维形状,原理相对简单,因而重建速度较快<sup>[1]</sup>。

近年来,由单幅或多幅图像的灰度信息来重建物体表面的三维形状已经成为图像处理中一个重要的研究方向。明暗恢复形状(shape from shading, SFS)和光度立体法(photometric stereo, PS)是两种典型的基于光度信息重建方法。SFS是在20世纪70年代由MIT的Horn<sup>[2]</sup>为了解决月球表面的三维形状重建时提出的,目标就是利用单幅图像的明暗变化来恢复物体表面各点的相对高度,其技术原理简单、适用性强,应用领域非常广泛<sup>[3-6]</sup>,其中一个重要的应用就是人脸重建<sup>[1,6]</sup>。传统的基于SFS的人脸重建方法通常假定人脸表面为Lambert表面,其反射特性遵循Lambert定律。而对于实际的漫反射表面,使用Lambert模型来计算物体表面的辐射亮度被证实是不精确的<sup>[7-8]</sup>。为了准确解决人脸表面的三维形状重建问题,本文设计了一种基于非Lambert从明暗恢复形状(NL-SFS)方法的三维人脸快速重建系统:首先介绍了重建系统的硬件结构,然后分析了重建系统的软件设计,最后对系统进行了实验验证。

## 1 基于 NL-SFS 方法的三维人脸重建系统

### 1.1 重建系统结构

基于NL-SFS方法的三维人脸重建系统由被重建人脸表面、光源、摄像机、计算机等构成。整个系统如图1所示,图中人脸表面某点处的方向向量为 $n$ ,光源的方向向量为 $L$ ,摄像机的方向向量为 $V$ 。

系统中,人脸表面接收光源的照射,反射的光线由摄像机镜头汇聚至成像面。摄像机最终获得的图像灰度信息即为图像辐照度,它记录了人脸表面的辐射亮度。图像信息经数据线(USB、网线或火线)进入计算机,计算机根据人脸的图像辐照度由系统软件计算得到人脸的三维形状,进而重建出人脸表面。

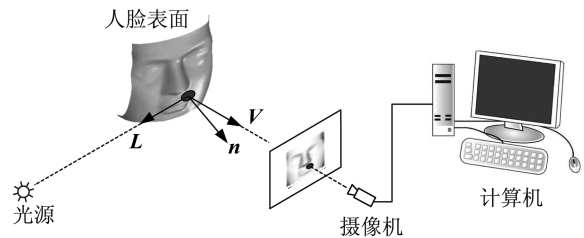


图 1 基于 NL-SFS 方法的三维人脸重建系统结构示意图  
Fig. 1 The schematic diagram of a 3D face recovery system based on NL-SFS approach

### 1.2 人脸表面的图像辐照度

为了表述人脸表面的辐照度,建立三维笛卡尔直角坐标系  $O-xyz$ :摄像机成像面为  $xy$  平面,光轴与  $z$  轴重合。在摄像机遵循正交投影条件下,利用 SFS 技术重建人脸三维形状实质上就是求解人脸表面的图像辐照度方程

$$I(x,y) = R(p(x,y),q(x,y)) \tag{1}$$

式中: $I(x,y)$ 为人脸表面的图像灰度信息; $R(p(x,y),q(x,y))$ 是人脸表面由反射模型确定的反射图。人脸三维形状函数  $z=z(x,y)$ 的表面法向量为

$$n = [p,q,-1]^T \tag{2}$$

式中: $p=p(x,y)=\partial z(x,y)/\partial x$ ; $q=q(x,y)=\partial z(x,y)/\partial y$ 。

对于传统的基于 SFS 的人脸重建方法通常假定人脸表面为 Lambert 表面,其反射特性遵循 Lambert 定律。若已知光源的方向向量为  $L=[p_s,q_s,-1]^T$ ,摄像机的方向向量为  $V=[p_c,q_c,-1]^T$ ,其中  $p_s,p_c$  和  $q_s,q_c$  分别为光源、摄像机方向向量在  $x$  和  $y$  轴的分量。此时,人脸表面的图像辐照度方程(1)为

$$I(x, y) = \frac{\mathbf{n}}{\|\mathbf{n}\|} \cdot \frac{\mathbf{L}}{\|\mathbf{L}\|} = \frac{1 + p_s p + q_s q}{\sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2} \sqrt{1 + p^2 + q^2}} \quad (3)$$

然而,对于实际的漫反射表面,Oren和Nayar证实了使用Lambert模型来计算物体表面的辐射亮度被证实是不精确的<sup>[7-8]</sup>。为了准确解决人脸表面的三维形状重建问题,本文使用文献[7]、[8]提出的非Lambert模型——Oren-Nayar模型描述其反射特性,这更接近于人脸表面实际的反射特性。Oren-Nayar模型将物体的表面视为由许多V型槽构成,且V型槽中两个微平面的斜率相同但方向相对,表面的粗糙度定义为微平面方向的概率分布函数。利用Gauss概率分布函数,可以得到人脸表面的反射式

$$R(p, q) = R(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \cos\theta_i \times (A + B \max[0, \cos(\varphi_r - \varphi_i)] \sin\alpha \tan\beta) \quad (4)$$

式中: $\theta_i, \varphi_i$ 和 $\theta_r, \varphi_r$ 分别为光源方向向量 $\mathbf{L}$ 和摄像机方向向量 $\mathbf{V}$ 相对于表面方向向量 $\mathbf{n}$ 的天顶角、方位角; $A = 1 - 0.5\sigma^2 / (\sigma^2 + 0.33)$ ,  $B = 0.45\sigma^2 / (\sigma^2 + 0.09)$ ,  $\sigma$ 为Gauss概率分布函数的标准差,代表了表面的粗糙程度; $\alpha = \max[\theta_i, \theta_r]$ ;  $\beta = \min[\theta_i, \theta_r]$ 。

为了使系统运算简便,本文设计的三维人脸重建系统中使光源与摄像机共线,即 $\theta_i = \theta_r = \alpha = \beta$ ,  $\varphi_r = \varphi_i$ ,反射式(4)简化为

$$R(p, q) = A \cos\theta_i + B \sin^2\theta_i \quad (5)$$

根据前面建立的坐标系,设摄像机的方向向量为 $[0, 0, -1]^T$ ,由于 $\theta_i$ 为 $\mathbf{n}$ 与 $\mathbf{L}$ 之间的夹角,故有

$$\cos\theta_i = \frac{\mathbf{n}}{\|\mathbf{n}\|} \cdot \frac{\mathbf{L}}{\|\mathbf{L}\|} = \frac{1}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \|\nabla z\|^2}} \quad (6)$$

$$\sin^2\theta_i = 1 - \cos^2\theta_i = \frac{\|\nabla z\|^2}{1 + \|\nabla z\|^2} \quad (7)$$

将式(5)、(6)、(7)代入方程(1),得到基于非Lambert模型的人脸表面图像辐照度方程

$$I(x, y) = \frac{A}{\sqrt{1 + \|\nabla z\|^2}} + \frac{B \|\nabla z\|^2}{1 + \|\nabla z\|^2} \quad (8)$$

## 2 三维人脸重建系统软件设计

重建系统软件设计的核心任务就是求解人脸表面的图像辐照度方程(8)。针对快速重建的需求,同时根据方程的特点,利用fast marching方法<sup>[9-10]</sup>设计了求解算法。Fast marching方法最早是由Sethian<sup>[9]</sup>提出的一种数值算法,用于快速求解如下形式的Eikonal方程的解,即

$$\|\nabla z(x, y)\| = f(x, y) \quad (9)$$

由上式可见,传统的fast marching方法只能求解Eikonal这类特殊形式的一阶偏微分方程。为了将fast marching方法应用于人脸表面的图像辐照度方程(8),将(8)看作关于 $g(x, y) = \sqrt{1 + \|\nabla z\|^2}$ 的一元二次方程,此时方程(8)可以等价于

$$(I(x, y) - B)g^2 - Ag + B = 0 \quad (10)$$

求解方程(10),并且满足 $g(x, y) \geq 1$ ,得到Eikonal方程的标准形式

$$\begin{cases} \|\nabla z(x, y)\| = \sqrt{g(x, y)^2 - 1} \\ g(x, y) = \frac{A + \sqrt{A^2 - 4(I(x, y) - B)B}}{2(I(x, y) - B)} \end{cases} \quad (11)$$

考虑重建系统中摄像机获取的图像分辨率大小为 $(0, m) \times (0, n)$ 的一个一致离散域: $\{(x_i, y_j) = (i h, j h), i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n\}$ ,  $(h, h)$ 定义了fast marching算法中离散网格的大小。根据文献[10]的计算过程,最终得到方程(11)的解,即人脸三维形状函数 $z(x, y)$ 的离散近似解 $z_{ij} = z(x_i, y_j)$

$$z_{ij} = \begin{cases} \frac{z_1 + z_2 + \sqrt{2h^2 g_{ij}^2 - (z_1 - z_2)^2}}{2} & |z_1 - z_2| < h g_{ij} \\ \min[z_1, z_2] + h g_{ij} & |z_1 - z_2| \geq h g_{ij} \end{cases} \quad (12)$$

综上,三维人脸重建系统整个软件流程可以归纳为如图2所示。

### 3 实验

为了验证重建系统的快速性及有效性,使用一幅已知三维形状的 Mozart 人脸图像和一幅实际拍摄的 Prados 人脸图像进行了实验,实验结果如图 3 和图 4 所示。

图 3(a)是 Mozart 人脸三维形状的真实高度值,图 3(b)为其灰度图像;图 3(c)是使用本系统重建的 Mozart 人脸三维形状,系统软件的运行时间为 0.9s,达到了快速重建的要求;图 3(d)为(c)与(a)之间的高度误差图,为了定量评价重建系统的有效性,使用高度平均相对误差作为评价指标,其计算结果为 0.43%,从上述结果可以看出,本系统具有较高的重建精度。

图 4(a)是实际拍摄的 Prados 人脸灰度图像,图 4(b)为使用基于 NL-SFS 方法重建的 Prados 人脸三维形状,图 4(c)是使用基于 SFS 方法重建的 Prados 人脸三维形状。由图 4(b)和(c)可以看出,基于 NL-SFS 方法与 SFS 方法相比,在上额、眼睑、鼻梁、下额及颧骨等处重建的结果更加逼真。总体而言,本系统重建的人脸三维形状的局部细节信息更加真实、有效。

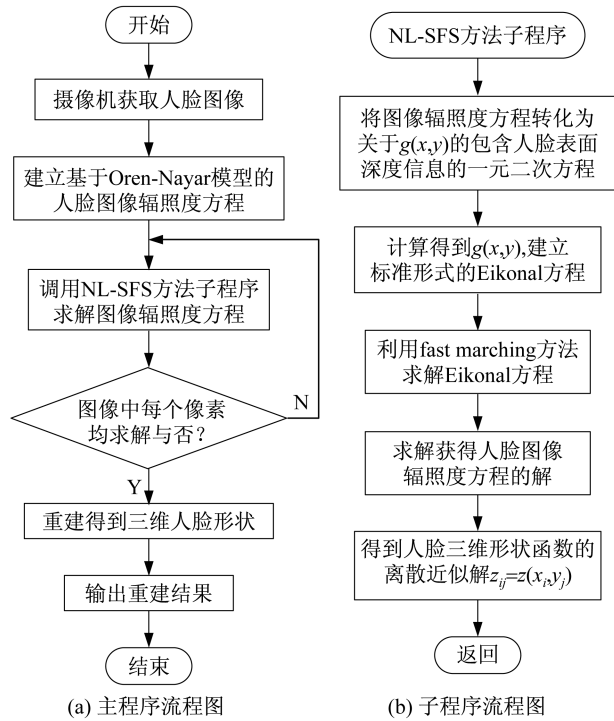


图 2 基于 NL-SFS 方法的三维人脸重建系统软件流程图  
Fig. 2 The software flow chart of a 3D face recovery system based on NL-SFS approach

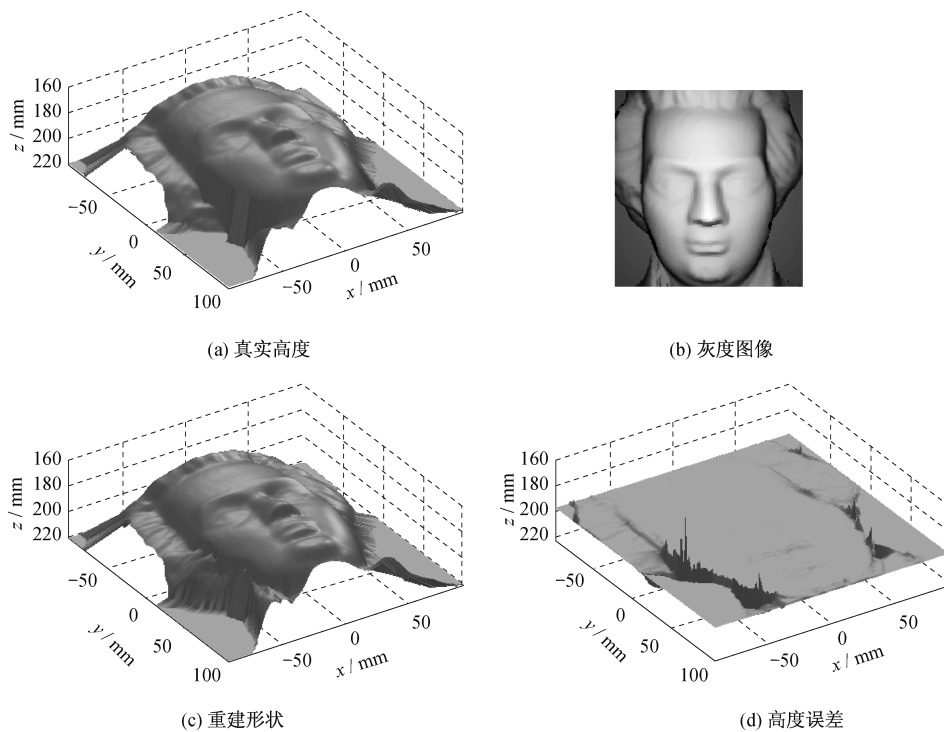


图 3 Mozart 人脸图像实验结果  
Fig. 3 The experimental results of the Mozart's face

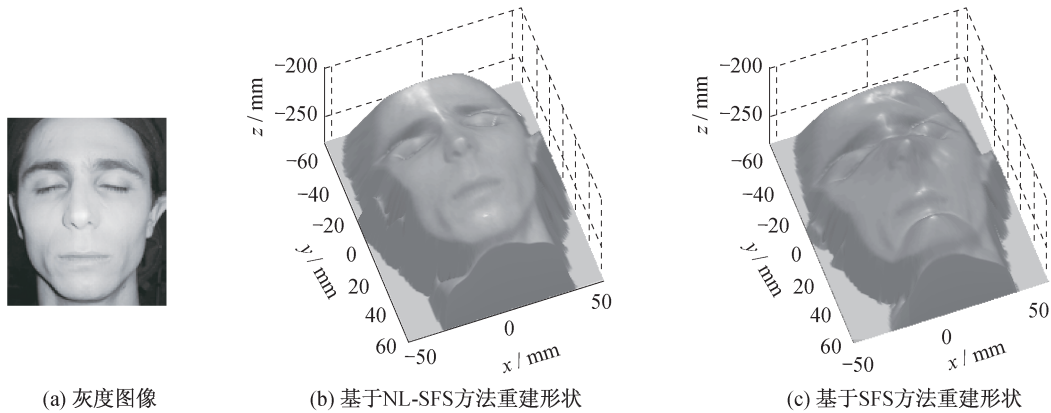


图4 Prados人脸图像实验结果

Fig. 4 The experimental results of the Prados's face

## 4 结论

本文设计了一种基于NL-SFS方法的三维人脸重建系统。系统中,人脸表面采用Oren-Nayar反射模型描述其反射特性,这更接近于人脸表面实际的反射特性,由遵循正交投影的摄像机获取光源作用下的人脸表面灰度图像,建立了人脸表面的图像辐照度方程,将此方程转化为包含人脸表面深度信息的Eikonal方程,利用fast marching方法设计了系统软件。实验结果表明:该系统能够快速,能有效地重建人脸三维形状。

## 参考文献:

- [1] 王国琿,苏炜,宋玉贵. 基于SFS方法的快速人脸三维重构系统[J]. 电视技术,2012,36(15):130-132.
- [2] HORN B K P. Height and gradient from shading [J]. International Journal of Computer Vision,1990,5(1):37-75.
- [3] 王国琿,苏炜,马凤军. 一种基于SFS方法的含高光表面三维重构系统[J]. 光学仪器,2012,34(4):86-89.
- [4] GRUMPE A,WOHLER C. Recovery of elevation from estimated gradient fields constrained by digital elevation maps of lower lateral resolution [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2014,94:37-54.
- [5] GONCALVES N,ROXO D,BARRETO J, et al. Perspective shape from shading for wide-FOV near-lighting endoscopes [J]. Neurocomputing,2015,150:136-146.
- [6] KEMELMACHER-SHLIZERMAN I,BASRI R. 3D Face reconstruction from a single image using a single reference face shape [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2011,33(2):394-405.
- [7] OREN M,NAYAR S K. Generalization of the Lambertian model and implications for machine vision [J]. International Journal of Computer Vision,1995,14(3):227-251.
- [8] WOLFF L B,NAYAR S K,OREN M. Improved diffuse reflection models for computer vision [J]. International Journal of Computer Vision,1998,30(1):55-71.
- [9] SETHIAN J A. Fast marching methods [J]. SIAM review,1999,41(2):199-235.
- [10] KIMMEL R,SETHIAN J A. Optimal algorithm for shape from shading and path planning [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision,2001,14(3):237-244.

(编辑:张磊)