

# 基于梯度光图像的高精度三维人脸重建算法

黄硕<sup>1,2,3</sup>, 胡勇<sup>1,2\*</sup>, 巩彩兰<sup>1,2</sup>, 卜弘毅<sup>1,4</sup>, 顾耕<sup>4</sup>, 许琦<sup>4</sup>, 王薇<sup>4</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

<sup>2</sup>中国科学院上海技术物理研究所红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>4</sup>中国科学院嘉兴光电工程中心, 浙江 嘉兴 314022

**摘要** 针对人的脸部特征复杂、细节纹理丰富, 获取高精度人脸三维模型成本高、工作量大的问题, 提出基于梯度光图像的高精度三维人脸重建算法。利用球形灯光装置建立 6 种不同的光照模式, 并利用偏振光特性对镜面反射光和漫反射光进行分离; 利用单向梯度光图像, 并基于双向反射分布函数(BRDF)得到反射光方向与法线方向的关系, 通过计算获取镜面反射和漫反射法线图; 将增强后的镜面反射和漫反射法线图进行融合, 并映射到低精度模型上, 可以重建出高精度的三维人脸模型。实验结果表明, 本文方法计算复杂度低, 重建精度高, 窗口大小为  $7 \times 7$  的高通滤波增强的镜面反射图和漫反射法线图以 2:1 的比例融合之后, 重建的效果最佳, 模型能精细到微尺度级。

**关键词** 图像处理; 三维重建; 梯度光; 双向反射分布函数; 法线贴图

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0410001

## High Precision Three-Dimensional Face Reconstruction Algorithm Based on Gradient Light Image

Huang Shuo<sup>1,2,3</sup>, Hu Yong<sup>1,2\*</sup>, Gong Cailan<sup>1,2</sup>, Bo Hongyi<sup>1,4</sup>, Gu Geng<sup>4</sup>,  
Xu Qi<sup>4</sup>, Wang Wei<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>2</sup> Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>3</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>4</sup> Jiaxing Opto-Electronic Engineering Center, Chinese Academy of Sciences, Jiaxing, Zhejiang 314022, China

**Abstract** To address the problems of complex and rich details of face features and heavy work and high cost of reconstructing high-precision three-dimensional (3D) face models, a high-precision 3D face reconstruction algorithm based on the gradient light image is proposed. Six different illumination modes are established using a spherical light device, and specular and diffuse reflection lights are separated using the polarization characteristic. Using a unidirectional gradient light image, specular and diffuse normal maps are obtained by calculation based on relationship between the reflection and normal directions by employing the bidirectional reflectance distribution function (BRDF). The obtained maps are merged and mapped to the low-precision mode to reconstruct a high-precision 3D face model. The experimental results show that the proposed method has low computational complexity and high reconstruction accuracy. Based on the obtained results, it is best to use the high-pass filtering with a window size of  $7 \times 7$  enhanced specular and diffuse reflection normal maps to achieve the best reconstruction at 2:1 map ratio fusion. The proposed model can be refined to microscale.

**Key words** image processing; three-dimensional reconstruction; gradient light; bidirectional reflectance distribution function; normal map

**OCIS codes** 100.3010; 100.2000; 100.2960

收稿日期: 2019-07-17; 修回日期: 2019-07-18; 录用日期: 2019-10-21

基金项目: 上海市科委项目(17411952800, 18441904500)

\* E-mail: shuo\_huang\_sitp@sina.com

# 1 引 言

三维(3D)重建<sup>[1]</sup>是指对三维物体建立适合计算机表示和处理的数学模型,是在计算机中建立表达客观世界的虚拟现实的关键技术。人脸表达了一个人的主要特征<sup>[2]</sup>,构建逼真度高的三维人脸模型一直以来是研究的热点和难点。高精度人脸建模技术是指重建可视范围内的人脸几何及纹理特征。在可视范围内,人的面部信息可以分为三个尺度<sup>[3]</sup>,即粗尺度(如鼻子、面颊、嘴唇等)、细尺度(如皱纹)和微尺度(如毛孔、痣和雀斑)。微尺度级别是逼真度最高也是最难达到的,本文方法可以获得微尺度的人脸三维模型。

Parke等<sup>[4]</sup>在1996年构建出第一代人脸模型,随后被人们不断地深入研究。目前三维重建的方法主要可以分为两类<sup>[5]</sup>。1)基于几何数据构建的三维人脸模型。该模型主要依靠激光扫描仪<sup>[6-8]</sup>和结构光扫描仪<sup>[9-11]</sup>直接获取人脸的几何信息。高精度扫描仪昂贵,反射率较低的部分会出现较差的扫描效果,时常会出现空洞和数据密度严重不均等问题。2)基于图像的三维人脸建模。该模型运用几何学和测量学知识获取二维图像上的人脸三维数据。Lee

等<sup>[12]</sup>运用正交图像重建目标人脸的三维模型,利用结构化的Snake模型提取人脸特征点。Roy Chowdhury等<sup>[13]</sup>利用视频影像进行三维人脸重建,采用运动恢复方法获得人脸几何信息,重建过程中运用马尔可夫链-蒙特卡罗优化提升重建效果。以上几种基于图像重建的方法虽然能简化数据获取成本,但是降低了人脸模型的精度,不能获取微尺度级的人脸效果。

本文基于多视角图像进行三维重建,结合法线贴图原理,在重建的低精度模型上投影高精度的法线信息,省去了高精度模型的复杂计算,可实现逼真的三维人脸重建效果。

## 2 基本原理

三维重建具体步骤(见图1):1)拍摄多角度的梯度光偏振图像和非偏振光全亮图像;2)将偏振图像进行镜面反射和漫反射分离,然后用两种反射光分别计算法线图;3)用多角度的非偏振图像拼接生成三维低精度模型;4)将2)中得到的镜面反射法线图和漫反射法线图进行处理并融合,得到最终的法线贴图;5)将法线贴图的法线信息映射在低精度模型上生成高精度的三维人脸模型。

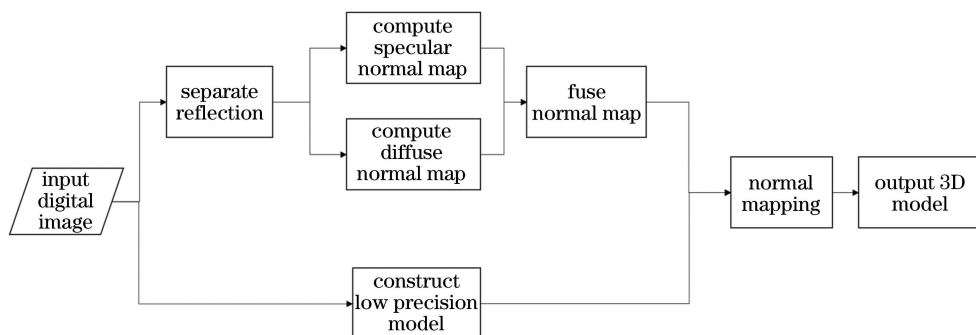


图1 三维人脸重建流程图

Fig. 1 Flowchart of 3D face reconstruction

### 2.1 镜面反射和漫反射分离

镜面反射光和漫反射光的反射特性不同,需要将镜面反射和漫反射分离后计算法线。镜面反射是光在两个折射率不同的介质之间表面发生的相互作用。当光线从空气射入折射率为 $n$ 的物体时,镜面反射特性可以由菲涅耳等式<sup>[14]</sup>描述为

$$r_s = \frac{\sin(\theta_t - \theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)}, r_p = \frac{\tan(\theta_t - \theta_i)}{\tan(\theta_t + \theta_i)}, \quad (1)$$

式中: $r_s$ 是垂直于入射光平面的反射光分量与入射光场能量的比值; $r_p$ 是平行于入射光平面的反射光分量和入射光场能量的比值; $\theta_i$ 和 $\theta_t$ 分别是入射角

和折射角,由反射角可以求得。

$$\theta_t = \arcsin\left(\frac{1}{n} \sin \theta_i\right). \quad (2)$$

(2)式反映出镜面反射光的极化状态由入射光的极化状态决定。不同的是,漫反射是由粗糙的介质表面散射产生的,几乎不受入射光偏振特性的影响。可以依照这个原理,通过控制入射光的偏振状态,同时测量反射光的偏振状态有效地分离出漫反射和镜面反射。

在光源和照相机镜头前放置线性偏振片,将光源偏振片调节至竖直方向,使反射光含有竖直

极化状态,将镜头前的偏振片调至水平方向,与灯光极化方向垂直,这时挡住了所有的镜面反射光,只通过一半的漫反射光,得到图像  $I_1$ ,其中  $I_1=0.5I_D$ ;然后将镜头偏振片调整至竖直方向与

灯光偏振方向平行,得到图像  $I_2$ ,  $I_2=0.5I_D+I_S$ 。所以漫反射图像为  $I_D=2I_1$ , 镜面反射图像为  $I_S=I_2-I_1$ 。图 2 是镜面反射和漫反射的分离图像。

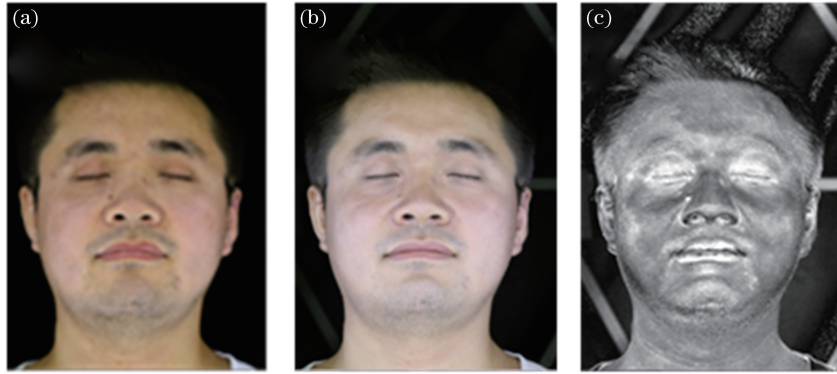


图 2 反射光分离结果。(a)垂直极化图像;(b)平行极化图像;(c)镜面反射光图像

Fig. 2 Results of reflected light separation. (a) Vertically polarized image; (b) parallel polarized image; (c) specular reflection image

实际操作中,由于整体灯光是一个球体装置,灯和相机的位置不在同一平行面,所以水平和垂直方向不能完全满足偏振条件,可通过旋转每一个灯的偏振片角度获得透过相机偏振片最弱的光线来得到漫反射光。

### 2.2 基于梯度偏振光的法线图获取

根据 Phong 反射光模型,反射光可以分解为环境光、漫反射光和镜面反射光。在去除环境光的条件下,求解法线时要将镜面反射光和漫反射光都考虑在内。目前的反射光获取方法<sup>[15-19]</sup>都需要依靠多种光照模式来获取不同的反射特性,反射光的方向取决于入射光和法线的方向。假设人脸所在的位置为原点,指向相机所在位置的方向为 Z 轴方向,垂直地面方向为 Y 轴方向,同时垂直于 Y、Z 轴的方向设为 X 轴方向,建立空间坐标系。采用 6 种照明方式拍摄图像:1)沿 X 方向的渐变光图像  $I(X)$ ;2)沿

-X 方向的渐变光图像  $I(-X)$ ;3)沿 Y 方向的渐变光图像  $I(Y)$ ;4)沿 -Y 方向的渐变光图像  $I(-Y)$ ;5)沿 Z 方向的渐变光图像  $I(Z)$ (-Z 方向是从背面照射,没有光射入镜头,不需要拍摄图像);6)全亮光图像  $I_c$ ,其中  $c$  是常数。6 种图像的拍摄结果如图 3 所示,6 种光照模式获取的图像可转换成 4 种梯度光图像  $I_x, I_y, I_z, I_c$ 。

$$\begin{cases} I_x = I(X) - I(-X) \\ I_y = I(Y) - I(-Y) \\ I_z = I(Z) \end{cases} \quad (3)$$

在空间坐标  $\omega \in \Omega$  中,定义 4 种梯度光模式  $P_i(\omega)$ ,四种模式分别为:一个恒量模式  $P_c(\omega)=1$ ;沿 X 方向的线性梯度模式,  $P_x(\omega)=\omega_x$ ;沿 Y 方向的线性梯度模式,  $P_y(\omega)=\omega_y$ ;沿 Z 方向的线性梯度模式,  $P_z(\omega)=\omega_z$ 。将  $\omega$  方向的标准向量记作  $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]$ 。

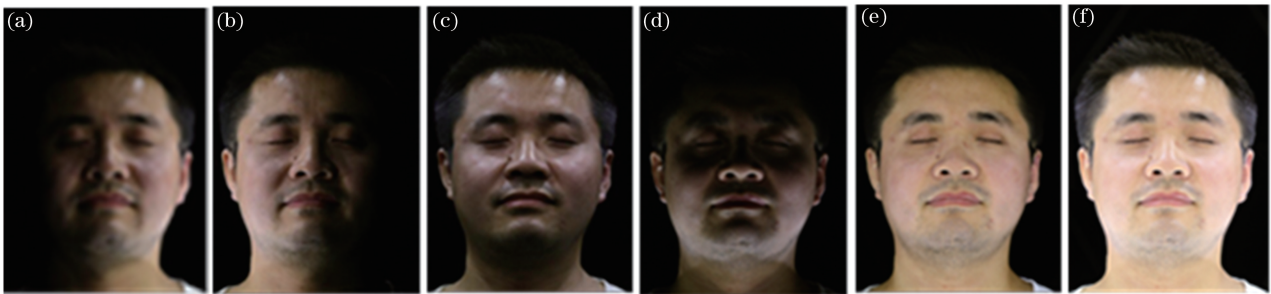


图 3 不同方向的梯度光图像。(a)沿 X 方向;(b)沿 -X 方向;(c)沿 Y 方向;(d)沿 -Y 方向;(e)沿 Z 方向;(f)全亮光

Fig. 3 Gradient light images in different directions. (a) Along the X direction; (b) along the -X direction; (c) along the Y direction; (d) along the -Y direction; (e) along the Z direction; (f) all light

通过梯度光照模式研究表面法线和反射的关系,由于漫反射和镜面反射具有不同的反射特性,因此反射和法线的关系也有所区别,可将两者分开讨论。

### 2.2.1 漫反射光求解法线

朗伯体光照模型可用于理想的漫反射物体,观察者所看到的反射光和观察角度无关,物体表面某一点的亮度是各向同性的<sup>[20]</sup>。

朗伯体双向反射分布函数(BRDF)为

$$R(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{n}) = \rho_d F(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{n}), \quad (4)$$

式中:  $\boldsymbol{\omega}$  是入射光照方向;  $\boldsymbol{n}$  是法线方向;  $F = \max(\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}, 0)$ ;  $\rho_d$  是散射反照率。从视角方向  $\boldsymbol{v}$  观测的反射率  $L_i$  为  $L_i(\boldsymbol{v})$ , 不考虑吸收和折射, 在照度模式  $P_i$  的情况下,

$$L_i(\boldsymbol{v}) = \int_{\Omega} P_i(\boldsymbol{\omega}) R(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{n}) d\boldsymbol{\omega}. \quad (5)$$

对于沿  $X$  方向的梯度模式  $P_x$ , 反射率的推导如下。将(5)式转换在局部坐标系  $\boldsymbol{T} = [\boldsymbol{s}, \boldsymbol{t}, \boldsymbol{n}]^T$  中, 其中  $\boldsymbol{s}$  和  $\boldsymbol{t}$  是任意互相垂直且都垂直于  $\boldsymbol{n}$  的向量, 法线向量  $\boldsymbol{n}$  与  $\boldsymbol{z} = [0, 0, 1]$  同向,  $\boldsymbol{\omega}' = [\omega'_s, \omega'_t, \omega'_n] = \boldsymbol{T}\boldsymbol{\omega}$ 。(5)式可写成

$$L_x(\boldsymbol{v}) = \int_{\Omega} (\omega'_s s_x + \omega'_t t_x + \omega'_n n_x) R(\boldsymbol{\omega}', \boldsymbol{z}) d\boldsymbol{\omega}', \quad (6)$$

其中  $s_x, t_x, n_x$  代表  $\boldsymbol{\omega}$  在局部坐标系坐标轴上的投影。事实上  $R(\boldsymbol{\omega}', \boldsymbol{z})$  不依赖于  $\boldsymbol{\omega}'$  的前两部分, 这部分积分值为 0, 从而(6)式可以化简为

$$L_x(\boldsymbol{v}) = \int_{\Omega} \omega'_n n_x R(\boldsymbol{\omega}', \boldsymbol{z}) d\boldsymbol{\omega}', \quad (7)$$

积分解出

$$L_x(\boldsymbol{v}) = n_x \times \frac{2\pi\rho_d}{3}. \quad (8)$$

沿  $Y$  和  $Z$  轴方向的梯度光也可以得到类似的结果, 三种光照模式中, 与法线向量相关的部分大小会根据常量  $\frac{2\pi\rho_d}{3}$  的大小而变化, 常量可以通过归一化去除。梯度光  $P_x, P_y$  和  $P_z$  定义在  $[-1, 1]$  范围内, 因为不存在负的光强度, 需将其转换到  $[0, 1]$  空间, 即

$$P'_i = \frac{1}{2}(P_i + P_c). \quad (9)$$

在没有加权和转换的梯度光模式下, 反射率为

$$L_i = 2L'_i - L_c. \quad (10)$$

在计算表面法线时, 不仅需要三种光照模式图像, 恒量光照模式也是需要获取的。综上, 利用归一化后的反射率就可以计算出漫反射的法线坐标。

### 2.2.2 镜面反射光求解法线

镜面反射方程为  $R(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{n}) = S(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{\omega}) \times F(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{n})$ , 其中  $\boldsymbol{r} = 2(\boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{v})\boldsymbol{n} - \boldsymbol{v}$ ,  $\boldsymbol{r}$  是镜面反射方向,  $S$  是镜面反射锥角。与朗伯体反射率方程不同, 镜面反射的反射锥角是对称的, 环绕着理想的反射方向。

假设: 1) 锥角  $S$  是非零的小角度, 并环绕着方向  $\boldsymbol{r}$ ; 2)  $F$  在这个锥角范围内是接近常量的。在两种情况下假设不成立: 1) 锥角很大; 2) 观察视角在余弦变化很大的地方。首先研究梯度方向沿着  $X$  轴的梯度光  $P_x$ , 类似于漫反射的情况, 依然会用到坐标空间的转换。将反射方向设定与  $\boldsymbol{z} = [0, 0, 1]$  同向。转换矩阵为  $\boldsymbol{T} = [\boldsymbol{s}, \boldsymbol{t}, \boldsymbol{r}]^T$ , 其中  $\boldsymbol{s}$  和  $\boldsymbol{t}$  是互相垂直的向量且都垂直于  $\boldsymbol{r}$ 。

$$L_x(\boldsymbol{v}) = \int_{\Omega} (\omega'_s s_x + \omega'_t t_x + \omega'_r r_x) S(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{\omega}') F(\boldsymbol{\omega}', \boldsymbol{n}') d\boldsymbol{\omega}', \quad (11)$$

式中:  $\boldsymbol{\omega}' = [\omega'_s, \omega'_t, \omega'_r] = \boldsymbol{T}\boldsymbol{\omega}$ ;  $\boldsymbol{n}' = \boldsymbol{T}\boldsymbol{n}$ 。假设  $F$  接近常数在非零的固定锥角  $S$  内, (11)式用  $c_F$  表示为

$$L_x(\boldsymbol{v}) \approx c_F \int_{\Omega} (\omega'_s s_x + \omega'_t t_x + \omega'_r r_x) S(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{\omega}') d\boldsymbol{\omega}', \quad (12)$$

积分角沿  $\boldsymbol{r}$  方向, 所以前两项为零, (12)式化简为

$$L_x(\boldsymbol{v}) \approx r_x c_F \int_{\Omega} \omega'_z S(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{\omega}') d\boldsymbol{\omega}'. \quad (13)$$

同理,  $Y$  和  $Z$  梯度可以得到相同的表达式。所有的表达式包含相同的积分, 这取决于  $S$  的精准定义、相同的常数  $c_F$ 、归一化向量  $[L_x(\boldsymbol{v}), L_y(\boldsymbol{v}), L_z(\boldsymbol{v})]$  得到视角方向的反射方向  $\boldsymbol{r} = [r_x, r_y, r_z]$ , 归一化的  $\boldsymbol{r}$  和  $\boldsymbol{v}$  的中间向量与镜面反射的法线方向相关, 由此可以得到物体表面的镜面反射法线。

## 2.3 法线贴图

法线贴图是将存储模型法线信息的贴图映射到低精度模型上。法线图可以表达模型的凹凸细节信息, 应用在低精度模型上可以模拟出高精度模型表面的纹理<sup>[21]</sup>。法线贴图的每一个像素都存储了模型的法线信息, RGB 三通道分别对应法线向量中的  $x, y, z$  三个分量。在应用法线贴图时, 法线图的每一个像素控制了低精度模型上对应顶点的法线向量, 使模型表面产生更多的细节模拟, 而低精度模型本身没有发生变化, 如图 4 所示。

## 3 实验与结果分析

### 3.1 图像获取

灯光球装置如图 5(a) 所示, 每一个灯的位置放



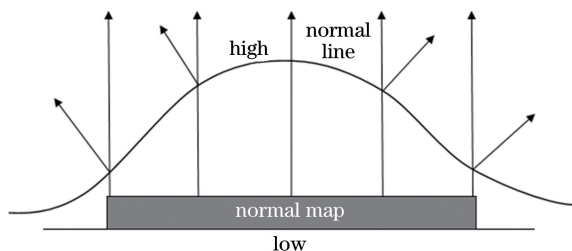


图 4 法线贴图原理

Fig. 4 Normal mapping principle

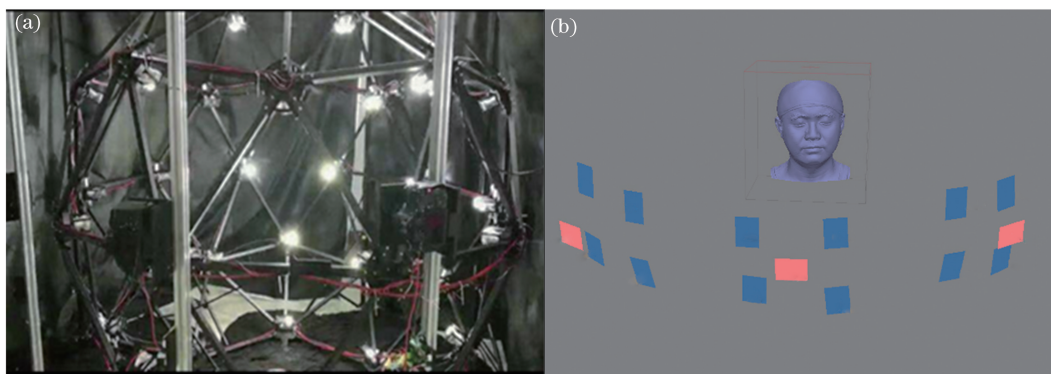


图 5 图像获取装置。(a)拍摄装置；(b)拍摄相机的相对位置

Fig. 5 Image acquisition device. (a) Shooting device; (b) relative position of the cameras

向的梯度漫反射光图像  $I_1$ ；调节所有灯的偏振片角度使得所有灯透过镜头偏振片的亮度最高，从而获取梯度偏振图像  $I_2$ 。

在镜面反射和漫反射分离时，由于整体灯光是一个球体装置，灯和相机的位置不在同一平行面，所以水平和垂直方向不能完全满足偏振条件，通过旋转每一个灯的偏振片角度获得透过相机偏振片最弱的光线来得到漫反射光。为了检验镜面反射和漫反射的分离结果并保证拍摄环境光的稳定性，可利用金属球的反射光来调整偏振条件。最终得到的拍摄环境如图 6 所示，在垂直偏振条件下，去掉镜面反射光，保留漫反射光。

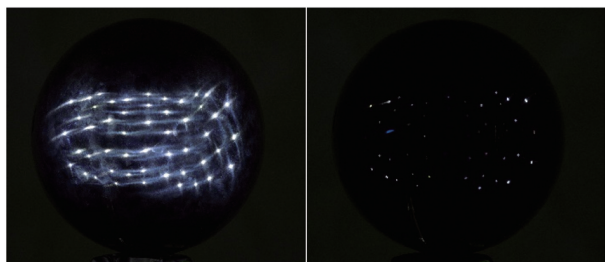


图 6 镜面反射和漫反射分离实验

Fig. 6 Experiment of specular reflection and diffuse reflection separation

### 3.2 三维重建

经过多次实验，发现使用 12 台不同角度的图像

置 5 W 和 3 W 的组合 LED 灯。15 台相机 (Canon600D) 放置于图 5(b) 所示位置，3 台用于获取法线，12 台用于低精度模型的创建。首先将灯光全部打开，拍摄 15 张不同角度的图像；再将偏振片调节至漫反射条件，在获取 X 方向的梯度光图像时，将 LED 灯功率沿 X 轴方向依次调节为 8 W、5 W、3 W，形成梯度偏振光照条件，拍摄 3 张不同角度的照片；按照相同的方式得到 -X、Y、-Y、Z 方

进行低精度模型重建的效果最佳。首先获取相机的坐标方位进行空间坐标系转换<sup>[22]</sup>，然后利用尺度不变特征变换 (SIFT) 算法获取特征点，对多角度图像进行拼接，得到人像的三维低精度模型。本文用 Agisoft PhotoScan 软件对图像进行拼接处理生成低精度模型。

将镜面反射和漫反射分离后，得到镜面反射和漫反射的法线图，漫反射表达了图像低频模型的法线分布状态，镜面反射表达了图像的细节纹理，所以将漫反射和镜面反射法线融合重建才能更加精准地表达人脸。用高频滤波方法处理镜面反射法线图，并用不同的融合比例进行对比实验。光线通过平行偏振片时，图像和反射光的关系为  $I_2 = 0.5I_D + I_S$ ，由于只包含 0.5 的漫反射，因此将漫反射法线图和镜面反射法线图融合比例设置为 2:1 和 1:1 两种。从图 7 可以看出，经过增强的镜面反射法线图与漫反射法线图融合后，法线图纹理明显增强。图 8 是三维重建结果的对比。图 8(a) 是基于图像重建的低精度模型，图像比较平滑，没有细节纹理；图 8(b) 中直接将漫反射法线图和镜面反射法线图按照 2:1 融合，得到的图像纹理增强，但是细节不足；图 8(c) 中对经过窗口大小为  $5 \times 5$  的高通滤波的镜面反射法线进行处理，按照 1:1 融合，得到的图像皮肤过于粗糙，鼻子上出

现颗粒;图 8(d)中高通滤波的滤波窗口为  $5 \times 5$ , 融合比例为 2:1,得到的图像相较于图 8(b)纹理清晰,但是细节略有不足;图 8(e)中高通滤波的滤波窗口为  $7 \times 7$ ,融合比例为 1:1,纹理过于粗糙;

图 8(f)中高通滤波的滤波窗口为  $7 \times 7$ ,融合比例为 2:1,相较于图 8(a)、(b)、(d)纹理更加清晰,相较于图 8(c)和(e)皮肤表面更加真实,达到了最优的效果。

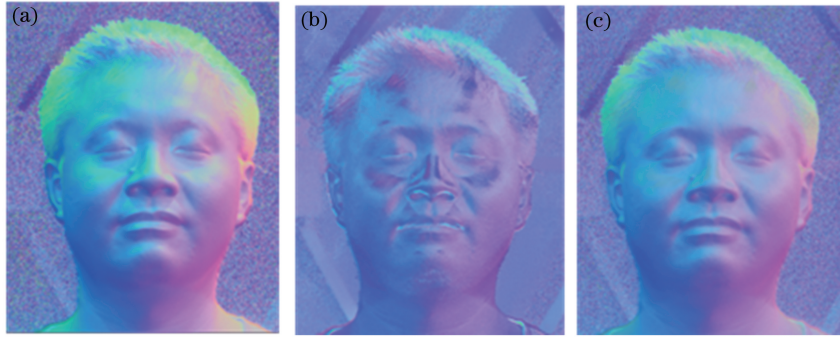


图 7 法线融合效果图。(a)漫反射法线图;(b)镜面反射法线图;(c)融合后法线图

Fig. 7 Results of normal map fusion. (a) Diffuse reflection normal map; (b) specular reflection normal map; (c) fusion normal map

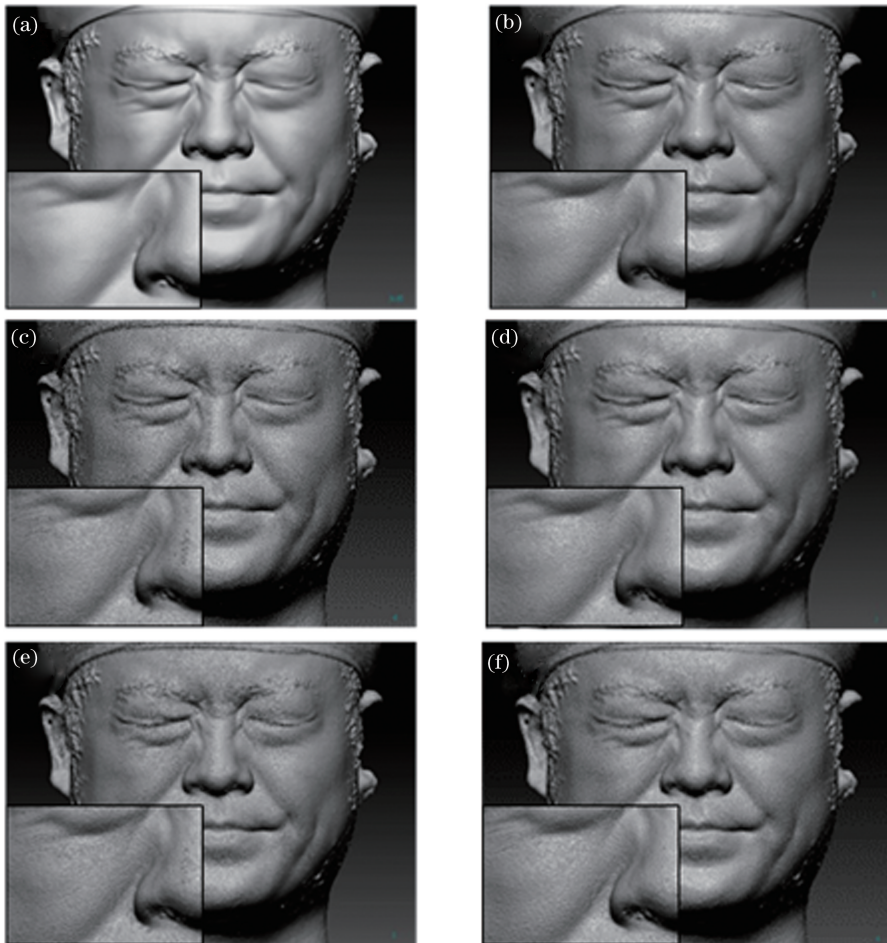


图 8 不同融合方式的法线图重建效果对比。(a)低精度模型;(b)按照 2:1 融合重建;(c)  $5 \times 5$  高通滤波和 1:1 融合比例重建;(d)  $5 \times 5$  高通滤波和 2:1 融合比例重建;(e)  $7 \times 7$  高通滤波和 1:1 融合比例重建;(f)  $7 \times 7$  高通滤波和 2:1 的融合比例重建

Fig. 8 Comparison of normal map reconstruction with different fusion modes. (a) Low precision model; (b) reconstruction with 2:1 fusion ratio; (c) reconstruction with  $5 \times 5$  high-pass filtering and 1:1 fusion ratio; (d) reconstruction with  $5 \times 5$  high-pass filtering and 2:1 fusion ratio; (e) reconstruction with  $7 \times 7$  high-pass filtering and 1:1 fusion ratio; (f) reconstruction with  $7 \times 7$  high-pass filtering and 2:1 fusion ratio



在世界坐标系中,相同位置的法线向量坐标相同。根据同名点特征,将三个角度的法线图进行匹配拼接,并将法线贴图的法线信息投影在低精度模型

上,最终得到高精度的三维人脸模型。图 9 展示了多角度图像和对应的法线图。图 10 是法线贴图后的高精度三维模型,图中毛孔和皮肤纹理清晰可见。



图 9 多视角图像。(a)多视角图像;(b)多视角法线图

Fig. 9 Multi-view images. (a) Multi-view images; (b) multi-view normal maps



图 10 精细三维人脸重建效果

Fig. 10 Results of fine 3D face reconstruction

基于法线贴图的三维重建方法不仅可以得到高精度的视觉模型,还能提高重建效率。模型重建时间和模型复杂度成正比,将高精度模型进行多级简化实验。表 1 描述了简化后模型的点云数和网格数,将简化后得到的低精度模型进行法线贴图渲染,如图 11 所示。实验结果证明,在模型简化到高精度模型的 7%时,进行法线贴图渲染,生成三维模型的

视觉效果优于对高精度模型直接渲染后的视觉效果。

表 1 简化模型参数

Table 1 Parameters of simplified model

Parameter	Model1	Model2	Model3
Poly	300010	101027	2102
Point	150660	50748	1075

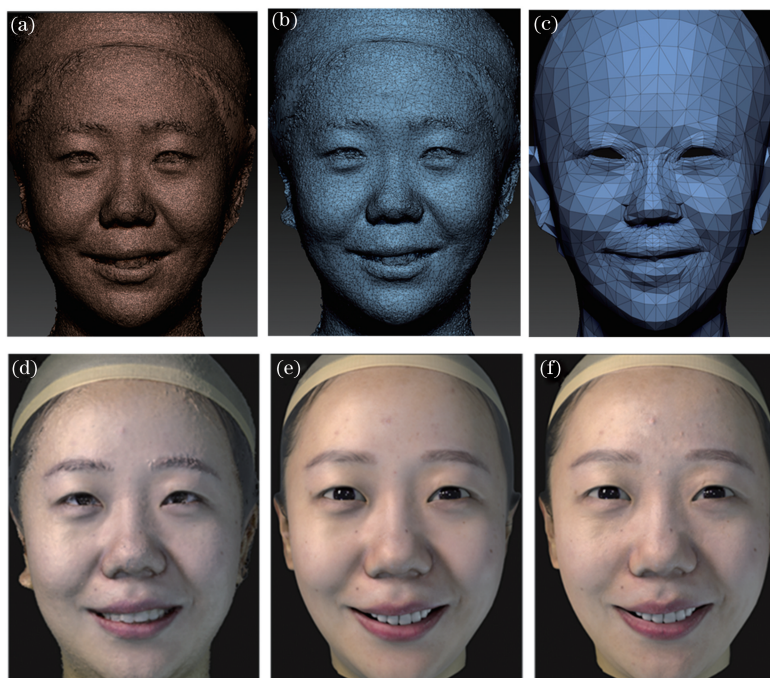


图 11 高精度模型和法线贴图模型的渲染图对比。(a)模型 1;(b)模型 2;(c)模型 3;(d)模型 1 渲染图;(e)模型 2 渲染图;(f)模型 3 渲染图

Fig. 11 Comparison of the render of highprecision model and normal map model. (a) Model1; (b) model2; (c) model3; (d) rendering of model1; (e) rendering of model2; (f) rendering of model3

## 4 结 论

人脸最能体现人物的特征,真实感三维建模方法研究一直是计算机图形学的研究热点。目前基于图像的人脸重建大多数在细尺度的程度,高逼真度的人脸模型市场需求量较大,但需要耗费大量的人力和物力成本。本文基于梯度光偏振图像,将漫反射和镜面反射分离求解法线后融合,通过法线贴图的方法重建三维人脸模型,得到了微尺度级别的人脸模型。图像重建人脸模型简化了重建过程。法线贴图降低了高精度模型的计算复杂度,重建效果有明显提升。从实验结果来看,三维重建逼真度高,毛孔和纹理清晰可见。目前对于人脸三维重建的结果还没有定量的评价标准,大多数都只是从视觉效果上作定性评价。从模型细节可见程度来设定微尺度级别,定量评价重建精度将有待进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] Wang Y, Wang X M. Research progress of three-dimensional reconstruction technique in the diagnosis and treatment of liver cancer[J]. Journal of Shenyang Medical College, 2014, 16(4): 229-230, 233.  
汪勇, 王小明. 三维重建技术在肝癌诊疗中的研究进展[J]. 沈阳医学院学报, 2014, 16(4): 229-230, 233.
- [2] Ma Q. Research of 3D face reconstruction based on a single image [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.  
马倩. 基于单张照片的三维人脸重建研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [3] Wang S, Shen X K, Zhao Q P. Review of 3D facial expression acquisition and modeling technology [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(7): 2423-2444.  
王珊, 沈旭昆, 赵沁平. 三维人脸表情获取及重建技术综述[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(7): 2423-2444.
- [4] Parke F I, Waters K, Peters A K. Appendix 1: three-dimensional muscle model facial animation[J]. Computer Facial Animation, 1996: 337-338.
- [5] Lü H Q, Li X F. A survey of realistic 3D face modeling technology [J]. Software Guide, 2018, 17(1): 1-3, 7.  
吕海清, 李雪飞. 真实感三维人脸建模技术综述[J]. 软件导刊, 2018, 17(1): 1-3, 7.
- [6] Lee S Y, Chwa K Y, Shin S Y, et al. Image metamorphosis using snakes and free-form deformations[C]//ACM SIGGRAPH 95 Visual Proceedings: The art and interdisciplinary programs of SIGGRAPH' 95, August 6-11, 1995, Los Angeles, CA, USA. New York: ACM, 1995: 439-



- 448.
- [7] Xu C H, Quan L, Wang Y H, et al. Adaptive multi-resolution fitting and its application to realistic head modeling[C] // Proceedings of Geometric Modeling and Processing, April 13-15, 2004, Beijing, China. New York: IEEE, 2004: 8030876.
- [8] Gu X, Wang Y, Chan T F, et al. Genus zero surface conformal mapping and its application to brain surface mapping [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2004, 23(8): 949-958.
- [9] Beumier C, Acheroy M. 3D facial surface acquisition by structured light[C] // International Workshop on Synthetic-Natural Hybrid Coding and Three Dimensional Imaging. [S.l.: s.n.], 1999: 103-106.
- [10] Tarini M, Cignoni P, Montani C. Ambient occlusion and edge cueing for enhancing real time molecular visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(5): 1237-1244.
- [11] Meyer G P, Do M N. Real-time 3D face modeling with a commodity depth camera[C] // 2013 IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops (ICMEW), July 15-19, 2013, San Jose, CA, USA. New York: IEEE, 2013: 13826079.
- [12] Lee W S, Magnenat-Thalmann N. Fast head modeling for animation [J]. Image and Vision Computing, 2000, 18(4): 355-364.
- [13] Roy Chowdhury A K, Chellappa R. Face reconstruction from monocular video using uncertainty analysis and a generic model [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2003, 91(1/2): 188-213.
- [14] Luo T, Yang Y G, Cong F Q. The interpretation of light-power distributing in Fresnel formula [J]. Journal of Changchun Teachers College, 2009(5): 12-14.  
罗涛, 杨以纲, 丛昉琦. 菲涅耳公式中的光强分布释疑[J]. 长春师范学院学报(自然科学版), 2009(5): 12-14.
- [15] Sloan P P. Normal mapping for precomputed radiance transfer[C] // Proceedings of the 2006 symposium on Interactive 3D graphics and games-SI3D'06, March 14-17, 2006, Redwood City, California. New York: ACM, 2006: 23-26.
- [16] Sato Y, Wheeler M D, Ikeuchi K. Object shape and reflectance modeling from observation[C] // Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques-SIGGRAPH'97, August 3-8, 1997, Los Angeles, California, USA. New York: ACM, 1997: 379-387.
- [17] Debevec P, Hawkins T, Tchou C, et al. Acquiring the reflectance field of a human face[C] // Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques-SIGGRAPH'00, July 23-28, 2000, New Orleans, LA, USA. New York: ACM, 2000: 145-156.
- [18] Lensch H P A, Kautz J, Goesele M, et al. Image-based reconstruction of spatial appearance and geometric detail[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(2): 234-257.
- [19] Gardner A, Tchou C, Hawkins T, et al. Linear light source reflectometry [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 749-758.
- [20] Weyrich T, Matusik W, Pfister H, et al. Analysis of human faces using a measurement-based skin reflectance model[C] // SIGGRAPH'06 ACM SIGGRAPH 2006 Papers, July 30-August 3, 2006, Boston, Massachusetts. New York: ACM, 2006: 1013-1024.
- [21] Ma W C, Hawkins T, Peers P, et al. Rapid acquisition of specular and diffuse normal maps from polarized spherical gradient illumination[C] // Proceedings of the 18th Eurographics conference on Rendering Techniques, June 25-27, 2007, Grenoble, France. New York: ACM, 2007: 183-194.
- [22] Xie Z X, Yu J S, Chi S K, et al. Underwater calibration and measurement based on non-parallel stereovision[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0912004.  
解则晓, 余江姝, 迟书凯, 等. 非平行双目视觉系统水下标定与测量[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0912004.