

基于 Phong 模型的多幅图像 SFS 算法研究

张 宁, 杨 磊

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘 要: 三维形状恢复是计算机视觉领域的热点之一。目前基于 Shape-From-Shading (SFS) 的三维形状恢复方法采用描述漫反射的 Lambertian 模型, 其数学形式简单, 但重构结果与实际有较大差距。文中提出了一种基于 Phong 模型的多幅图像 SFS 三维形状恢复算法, 该模型是一种典型的描述镜面反射的非 Lambertian 模型。首先由摄像机获得单目三幅不同光源位置的图像。然后求解由 Phong 模型描述的三个反射图方程, 得到物体表面梯度向量。进一步利用灰度约束和梯度分量约束条件构造目标泛函, 建立相应的 Euler-Poisson 方程并采用离散差分近似微分运算, 得到物体表面三维形状恢复的迭代算法。提出的算法利用三幅图像的灰度值建立方程组, 求得唯一确定的表面梯度数值, 解决了传统单幅图像恢复三维形状的病态问题。同时基于非 Lambertian 模型建立反射图方程, 可对含有镜面反射的表面进行三维形状恢复。最后通过仿真实验说明算法的有效性。

关键词: Phong 模型; 三维重建; Shape-From-Shading; 反射图方程

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2013)01-0009-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2013.01.003

Research on Algorithm of SFS for Multi-images Based on Phong Model

ZHANG Ning, YANG Lei

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Three-dimensional (3-D) shape reconstruction is one of the main problems in the field of computer vision. Most existing Shape-From-Shading (SFS) methods are based on the Lambertian reflectance model. The mathematical form of Lambertian reflectance model is simple, but reconstruction results of corresponding algorithms are relative poor compared with real 3-D shape of surfaces. New SFS algorithm based on the Phong model to reconstruct 3D shape of surface is proposed in this paper. The Phong model is a typical kind of non-Lambertian model to describe specular reflection. Three images with different light source directions are captured by camera firstly. Following three reflectance map equations which are described by Phong model are established. Then the gradient vectors of the 3-D surface are calculated by solving the equations. The gray constraint and gradient component constraint conditions are used to construct target function, and the corresponding Euler-Poisson equations are derived. Simultaneously, discrete difference is used to approximate differential operation. New iterative 3-D shape reconstruction algorithm is proposed by the discrete difference equation. Three pixels values are used to solve certain gradient value in this method. So the ill-posed problem in traditional SFS which solves a single reflectance map equation can be avoided. At the same time, the algorithm solves the reflectance map equations which based on non-Lambertian model. So the proposed method can reconstruct 3D shape of surface containing specular reflection. At last, experimental results of 3-D reconstruction show that the proposed method is effective.

Key words: Phong model; 3-D shape reconstruction; Shape-From-Shading; reflection map equation

0 引 言

由图像灰度明暗变化来恢复物体表面三维形状

Shape-From-Shading (SFS) 是计算机视觉中的热点问题之一, 广泛应用于工业生产、医学图像重构、SAR 图像地形地貌测量以及月球或星球表面的三维形状恢复等^[1~4]。由图像灰度的明暗变化恢复表面三维形状, 早在 20 世纪 70 年代就由 Horn 等人提出^[5,6]。由图像灰度明暗变化来恢复物体表面三维形状的原理是根据由反射模型描述的反射图方程建立物体表面形状与图像亮度之间的约束关系, 并结合适当约束条件来对方程求解, 即可得到物体表面的三维形状。由图像恢

收稿日期: 2012-05-04; **修回日期:** 2012-08-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61005015); 上海高校青年教师培养资助计划项目

作者简介: 张 宁 (1989-), 男, 安徽巢湖人, 硕士研究生, 研究方向为数字图像处理; 杨 磊, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为数字图像处理。

复物体形状是求解图像反射图方程

$$E(x, y) = R(p(x, y), q(x, y)) \quad (1)$$

式中 $E(x, y)$ 是摄像机采集的归一化灰度图像(图像的辐射度), $R(p(x, y), q(x, y))$ 是由反射模型描述的反射图, $(p(x, y), q(x, y))$ 是物体的表面在像素点 (x, y) 的梯度矢量。在 SFS 中可先求出梯度矢量后通过积分求解的方法得到物体的表面形状。然而求解反射图方程是一个病态问题。反射图方程(1)式通常是一个一阶非线性偏微分方程。必须增加一些约束条件, 一般使用正则化方法使得 SFS 问题转化为带约束条件的优化问题, 以此来获取物体的表面信息^[6]。Horn 的解决方法是源于变分法的思想, 考虑图像像素灰度与和反射图间的整体误差, 进而求解目标函数的极小值, 得到一组 Euler 方程, 然后利用迭代的方法得到物体的高度值。后来学者又提出了有限元算法、神经网络算法、水平集算法以及粘性解方法等^[7-10]。

利用多幅图像对 SFS 反射图方程进行求解可避免其病态性问题^[7], 以及所谓的光度立体视觉方法^[11, 12]。同时目前 SFS 研究中主要采用描述漫反射的 Lambertian 模型, 其数学形式简单, 但重构结果与实际有较大差距。Phong 模型是一种典型的描述镜面反射的非 Lambertian 模型。文中提出了一种基于 Phong 模型的多幅图像 SFS 三维形状恢复算法。一方面利用三幅图像的灰度值求解反射图方程, 解决了由单幅图像恢复形状的病态问题。同时基于非 Lambertian 模型建立反射图方程, 可对含有镜面反射的表面进行三维形状恢复。提出方法的具体思路如下: 首先固定摄像机的位置, 采集不同光源的三幅图像, 提取每幅图像像素点的灰度值。然后对于每一个像素点建立三个反射图方程, 对其联立求解得到唯一确定的梯度向量。最后通过构造目标泛函与离散差分近似微分运算离散化方法得到三维高度恢复的迭代计算公式。最后通过仿真实验说明提出算法的有效性。

1 基于 Phong 模型的反射图方程

假设像平面为 xy , 摄像机方向与 z 轴重合, 在正交投影成像条件下, SFS 问题是求解图像的反射图方程 $E(x, y) = R(p(x, y), q(x, y))$ 。物体的表面函数为 $z = z(x, y)$, 其表面法向量为

$$\mathbf{n} = [p(x, y), q(x, y), -1]^T \quad (2)$$

式中

$$\begin{cases} p(x, y) = \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \\ q(x, y) = \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \end{cases} \quad (3)$$

已知光源方向向量为 $\mathbf{n}_0 = [p_0, q_0, -1]^T$, 摄像机

方向向量为 $\mathbf{n}_c = [p_c, q_c, -1]^T$, 其中 p_0 和 q_0 分别是光源方向在 x 轴和 y 轴方向的分量, p_c 和 q_c 分别是摄像机方向向量在 x 轴和 y 轴方向的分量。对于 Lambertian 反射模型, 反射图方程为

$$E(x, y) = \frac{p_0 p + q_0 q + 1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1} \sqrt{p_0^2 + q_0^2 + 1}} \quad (4)$$

式中 $E(x, y)$ 是归一化灰度图像。上述方程是一个关于表面函数 $z = z(x, y)$ 的非线性偏微分方程, 加上适当的边界条件可以求解, 如果边界条件不完备则是一个病态问题^[6]。

光源与摄像机中垂线的方向是镜面反射方向, 其方向向量为 $[(p_c + p_0)/2, (q_c + q_0)/2, -1]^T$, 记为 $[p_h, q_h, -1]^T$ 。对于含有镜面反射表面的反射图用 Phong 模型表示。Phong 模型所描述的反射图方程可表示为^[11]

$$E(p, q) = \left(\frac{pp_h + qq_h + 1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1} \sqrt{p_h^2 + q_h^2 + 1}} \right)^K \quad (5)$$

式中 $K \in \mathbb{Z}^+$ 是镜面反射指数因子, 其值可用同类材质表面形状已知的图像测得。

2 单目多幅图像求解表面梯度向量

单目多幅图像求解表面梯度向量的思想是: 固定摄像机的位置, 采集不同光源的三幅图像, 提取每幅图像像素点的灰度值, 对于每一个像素点建立三个反射图方程, 对其联立求解得到唯一确定的梯度向量。该方法的优点之一是避免了三幅图像对应像素点的匹配。文中假设不同光源的三幅图像的像素点没有被遮挡或阴影。如果存在被遮挡或阴影的情况可以将三幅图像推广到多幅图像, 其中三幅图像在该像素点灰度数值不为零即可。

设采集图像分辨率为 $M * N$, $i \in [1, M]$, 对应 x 坐标; $j \in [1, N]$, 对应 y 坐标。三幅不同光源方向的数字图像在像素点 (i, j) 的归一化灰度数值为 $E_1(i, j)$, $E_2(i, j)$, $E_3(i, j)$ 。

设采集三幅图像时光源方向向量分别为 $(p_1, q_1, -1)^T$, $(p_2, q_2, -1)^T$, $(p_3, q_3, -1)^T$, 对应的镜面反射方向向量分别为 $[p_{h1}, q_{h1}, -1]^T$ 、 $[p_{h2}, q_{h2}, -1]^T$ 及 $[p_{h3}, q_{h3}, -1]^T$, 则相应的反射图方程为

$$\begin{cases} E_1(i, j) = \left(\frac{p(i, j)p_{h1} + q(i, j)q_{h1} + 1}{\sqrt{p^2(i, j) + q^2(i, j) + 1} \sqrt{p_{h1}^2 + q_{h1}^2 + 1}} \right)^K \\ E_2(i, j) = \left(\frac{p(i, j)p_{h2} + q(i, j)q_{h2} + 1}{\sqrt{p^2(i, j) + q^2(i, j) + 1} \sqrt{p_{h2}^2 + q_{h2}^2 + 1}} \right)^K \\ E_3(i, j) = \left(\frac{p(i, j)p_{h3} + q(i, j)q_{h3} + 1}{\sqrt{p^2(i, j) + q^2(i, j) + 1} \sqrt{p_{h3}^2 + q_{h3}^2 + 1}} \right)^K \end{cases} \quad (6)$$

由上式得

$$\begin{bmatrix} c_1 p_{h1} - p_{h2} & c_1 q_{h1} - q_{h2} \\ c_2 q_{h1} - p_{h3} & c_2 q_{h1} - q_{h3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(i,j) \\ q(i,j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - c_1 \\ 1 - c_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{式中 } c_1 = \left(\frac{E_2(i,j)}{E_1(i,j)} \right)^+ \frac{\sqrt{p_{h2}^2 + q_{h2}^2 + 1}}{\sqrt{p_{h1}^2 + q_{h1}^2 + 1}},$$

$$c_2 = \left(\frac{E_3(i,j)}{E_1(i,j)} \right)^+ \frac{\sqrt{p_{h3}^2 + q_{h3}^2 + 1}}{\sqrt{p_{h1}^2 + q_{h1}^2 + 1}}。$$

求解上面式子可以得到三维表面的梯度向量 $(p(i,j), q(i,j), -1)^T$ 。

3 表面三维高度重构算法

表面梯度向量经过积分或者求解含有一定约束条件的泛函极值^[7]可以得到表面三维高度。两者具有等价性。文中采用约束条件泛函极值方法。将 $p(x,y)$ 、 $q(x,y)$ 和 $z(x,y)$ 视为独立泛函,设含有正则化约束条件的目标泛函 E 为

$$E = \iint_D (R(x,y) - E(x,y))^2 + \lambda((p - z_x)^2 + (q - z_y)^2) dx dy \quad (8)$$

令 $F = (R(x,y) - E(x,y))^2 + \lambda((p - z_x)^2 + (q - z_y)^2)$,由变分引理得泛函 E 取极小值对应的 Euler-Poisson 方程是

$$F_z - \frac{\partial}{\partial x} F_{z_x} - \frac{\partial}{\partial y} F_{z_y} = 0 \quad (9)$$

即

$$z_{xx} + z_{yy} = p_x + q_y \quad (10)$$

采用离散差分近似微分算法,即 $p_x = (p(i+1,j) - p(i-1,j))/2h$ 、 $q_y = (q(i,j+1) - q(i,j-1))/2h$ 、 $z_{xx} = (z(i+1,j) - 2z(i,j) + z(i-1,j))/h$ 以及 $z_{yy} = (z(i,j+1) - 2z(i,j) + z(i,j-1))/h$ 。设图像像素为单位距离($h=1$),则有

$$(z_{i+1,j} + z_{i-1,j} + z_{i,j+1} + z_{i,j-1}) - 4z_{i,j} = \frac{1}{2}(p_{i+1,j} - p_{i-1,j} + q_{i,j+1} - q_{i,j-1}) \quad (11)$$

得到高度函数的迭代计算公式

$$z_{i,j}^{(k+1)} = \frac{1}{4}(z_{i+1,j}^{(k)} + z_{i-1,j}^{(k)} + z_{i,j+1}^{(k)} + z_{i,j-1}^{(k)}) - \frac{1}{8}(p_{i+1,j} - p_{i-1,j} + q_{i,j+1} - q_{i,j-1}) \quad (12)$$

式中 $k=1,2,\dots,N$,是迭代计算次数。

4 仿真结果

通过对半球和花瓶函数在 Phong 反射模型下合成图像三维形状进行重构试验说明提出算法有效性。

4.1 半球函数三维形状恢复实验结果

实验采用 Phong 反射模型生成三幅半球体的图像进行三维形状恢复。图 1 是光照方向向量分别为 $(0,0,-1)$ 、 $(0.06,0,-1)$ 和 $(0,0.08,-1)$ 条件下式(5)合成的三幅半球体的灰度图像,其中镜面反射指数因子 $K=5$,像素灰度值计算后乘以 255 并取整。图 2(a)是原半球函数的三维形状,图 2(b)是用提出算法恢复出的形状,图 2(c)两者之间的误差。

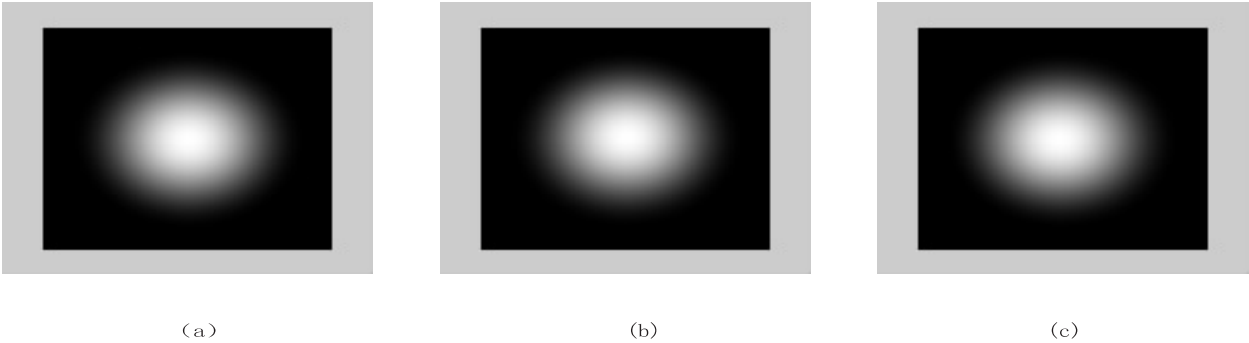


图 1 不同光照方向条件下合成的三幅半球图像

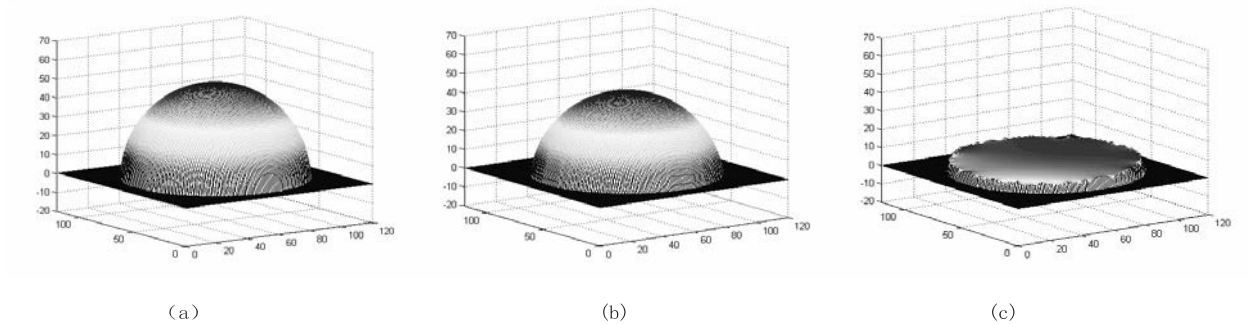
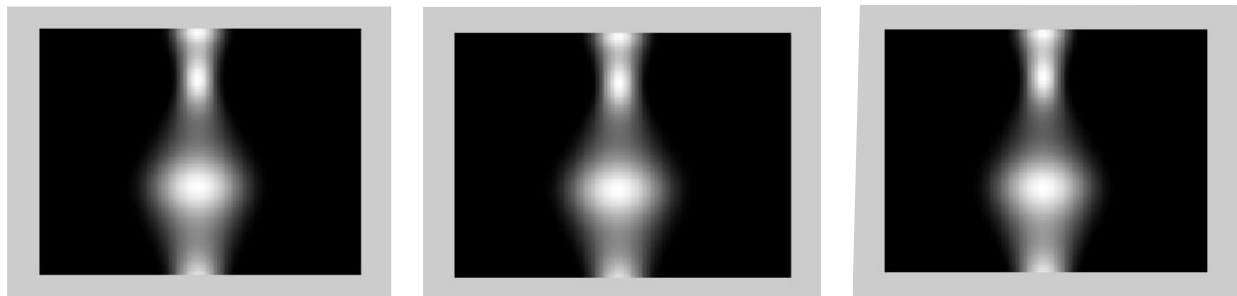


图 2 原半球形状、文中算法恢复的半球以及两者之间的误差

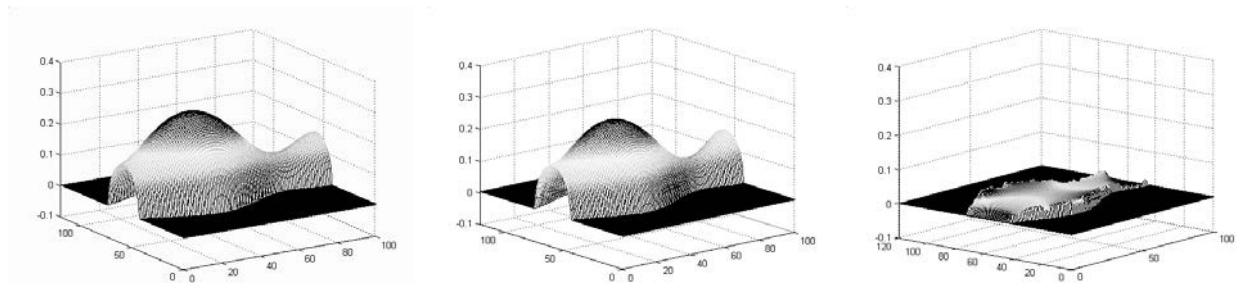


(a)

(b)

(c)

图 3 不同光照方向条件下合成的三幅花瓶图像



(a)

(b)

(c)

图 4 原花瓶函数的形状、文中算法恢复的花瓶形状以及两者之间的误差

4.2 花瓶函数三维形状恢复实验结果

图 3 是相同条件下式(5)合成的三幅花瓶函数^[12]的灰度图像。

图 4 分别是原花瓶函数的形状、提出算法恢复的三维形状以及两者之间的误差。

5 结束语

由图像灰度形状是计算机视觉领域的重要研究课题。目前 SFS 三维形状恢复方法主要采用描述漫反射的 Lambertian 模型,其数学形式简单,但恢复误差大。文中提出了一种基于 Phong 模型的多幅图像 SFS 三维形状恢复算法。通过求解由 Phong 模型描述的三个反射图方程,得到物体表面梯度向量;进一步利用灰度约束和梯度分量约束条件构造目标泛函,建立相应的 Euler-Poisson 方程并采用离散差分近似微分运算,得到物体表面三维形状恢复新算法。最后半球和花瓶函数三维恢复实验验证了提出算法的有效性。提出的算法克服了传统单幅图像恢复形状算法的唯一性问题,同时可处理含有镜面反射的表面。

参考文献:

- [1] Wu C, Srinivasa G N, Jaramaz B. A multi-image shape-from-shading framework for near-lighting perspective endoscopes [J]. International Journal of Computer Vision, 2010, 86(2): 211-228.
- [2] William A P, Hancock S R E. Estimating facial reflectance properties using shape-from-shading [J]. International Jour-

nal of Computer Vision, 2010, 86(2): 152-170.

- [3] Lee M, Choi C H. Facial shape recovery from a single image with an arbitrary directional light using linearly independent representation [C]//ISVC 2009. [s. l.]: [s. n.], 2009: 740-749.
- [4] Stephan W, Anita S, Ole S, et al. Image-based Lunar surface reconstruction [C]//DAGM 2009. [s. l.]: [s. n.], 2009: 382-391.
- [5] Horn B K. Numerical shape from shading and occluding boundaries [J]. Artificial Intelligence, 1981, 17(1-3): 141-184.
- [6] Horn B K. Height and gradient from shading [J]. Int J of Computer Vision, 1990, 5(1): 37-75.
- [7] Zhang R, Tsai P S, Cryer J E, et al. Shape from shading: a survey [J]. IEEE Trans. on PAMI, 1999, 21(8): 690-706.
- [8] Durou J D, Falcone M, Sagona M. Numerical methods for shape-from-shading: a new survey with benchmarks [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 109(1): 22-43.
- [9] Rouy E, Tourin A. A viscosity solutions approach to shape-from-shading [J]. SIAM Journal of Numerical Analysis, 1992, 29(3): 867-884.
- [10] Lee K M, Kuoc J. Shape from shading with a linear triangular element surface model [J]. IEEE Trans on PAMI, 1993, 15(8): 815-822.
- [11] 苏秋萍, 司存瑞. 基于多幅图像的三维形状恢复新算法研究 [J]. 航空计算技术, 2007, 37(4): 18-19.
- [12] 朱庆生, 罗大江, 葛亮, 等. 基于多幅图像的三维重建 [J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(10): 2351-2357.

基于 Phong 模型的多幅图像 SFS 算法研究

作者: [张宁, 杨磊](#)
作者单位: [上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072](#)
刊名: [计算机技术与发展](#)
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2013(1)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjtz201301005.aspx