

文章编号: 1006-5911(2009)10-1951-05

一种改进的灰度重构形状光照模型及其实现

赵辉煌¹, 周德俭^{2,3}, 黄春跃³

(1. 西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071; 2. 广西工学院 机械工程系, 广西 柳州 545006;
3. 桂林电子科技大学 机电工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对基于灰度重构形状的表面三维重构方法中重构精度不高的问题, 提出一种改进的光照模型。该模型不仅改进了物体表面的漫反射分量, 而且考虑了物体表面镜面反射分量对表面重构所产生的影响, 把漫反射分量和镜面反射分量线性叠加。采用有限差分法离散改进光照模型中的变量, 再利用 Jacobi 迭代法求解改进光照模型, 得到物体表面点的重构高度值。以金属半球图像为例, 分别采用改进的光照模型和传统光照模型进行三维重构。通过结果分析表明, 采用改进的光照模型提高了重构精度, 重构后的高度误差降至 12.19%。

关键词: 灰度重构形状; 光照模型; 三维重构; Jacobi 迭代
中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

Improved illumination model of shape from shading and its realization

ZHAO Hui-huang¹, ZHOU De-jian^{2,3}, HUANG Chun-yue³

(1. School of Mechatronics Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;
2. Department of Mechanical Engineering, Guangxi University of Technology, Liuzhou 545006, China;
3. School of Mechatronics Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: To improve the precision of imaging three-dimensional reconstruction based on shape from shading, an improved illumination model was proposed. This model not only improved the diffusion reflectance component, but also considered the influence of specular reflectance component with linear superposition. The variables of the model were dispersed by using finite difference method and the model was solved by using Jacobi iteration. Then, the three-dimensional reconstruction height was obtained. By taking the metallic ball image as example and reconstructing its three-dimensional image, the experimental results showed that the relative height error after using improved illumination model was dropped by 12.19% compared to the traditional methods.

Key words: shape from shading; illumination model; three-dimensional reconstruction; Jacobi iteration

0 引言

由图像灰度重构形状(Shaping from Shade, SFS), 即根据一个确定的反射模型建立物体表面形状与图像亮度之间的约束关系, 并根据对物体表面形状的先验知识, 建立物体表面形状参数的约束关系, 联立求解可得物体表面的三维形状^[1]。其特点

是只需要单幅图像就可以解决表面重构问题。近年来, 国内外很多学者利用 SFS 方法实现了单幅图像的三维重构, 并将其应用到工业检测与测量、模式识别、逆向工程及自然景物模拟等领域^[2-4]。

光照模型用来客观地描述光照反射现象, 是 SFS 重构技术的基础, 其精度直接影响单幅图表面重构的精度, 同时光照模型应该具有简单的数学表达式, 以

收稿日期: 2008-08-25; 修订日期: 2009-01-12。Received 25 Aug. 2008; accepted 12 Jan. 2009.

作者简介: 赵辉煌(1982-), 男, 湖南衡阳人, 西安电子科技大学机电工程学院博士研究生, 主要从事制造自动化、模式识别等的研究。

E-mail: zhaohuihuang278@163.com.

方便求解。但现有的 SFS 方法仍存在曲面重构精度较低的问题^[5]。目前,国内外许多学者针对不同的应用对象提出了各自的光照模型^[6]。本文以 Oren-Nayar 光照模型为基础,提出一种改进的光照模型。实例表明,该模型对提高图像表面重构精度有一定的效果,重构后的高度误差降低至 12.19%。

1 光照模型

光照模型即根据光学物理的有关定律,计算物体表面上任一点投向观察者眼中的光亮度大小和色彩组成的数学公式,用来描述光照射到物体表面发生的反射、折射和吸收等物理现象^[7]。光照模型根据其推导原理可分为几何光照模型和物理光照模型两种。几何光照模型的基础是几何光学原理,在其公式推导过程中假设多个理想条件,其数学表达式较为简单,一般为经验模型,精度较低,主要用于图像的渲染领域,无法精确描述光照过程的物理现象,其中 Lambert 模型是典型的几何光照模型;物理光照模型的基础是电磁波反射理论,其精度较高,能够客观地描述光照物理现象,但是其数学表达式复杂,典型的物理光照模型有 Oren-Nayar 模型和 HE 模型^[8]。

1.1 光照漫反射模型改进

Lambert 模型是理想情况下的漫反射表面,假设光在物体表面只存在漫反射。由于该模型没有考虑观察方向对反射结果的影响,只能对反射现象做近似描述,在精度上还有较大误差。针对 Lambert 模型存在的缺点,文献[9]提出了一种新的描述粗糙表面反射现象的光照模型,其模型公式如下:

$$L_d(\theta, \theta, \phi_r - \phi_i; \sigma) = \frac{\rho}{\pi} L_i \cos \theta_i (A + B[0, \cos(\phi_r - \phi_i)] \times \sin \alpha \tan \beta)。 (1)$$

式中: $A = 1 - 0.5 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.33}$, $B = 1 - 0.45 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.99}$; σ 为高斯分布的标准方差,由物体表面粗糙度确定; ρ 为表面反射率; L_i 为入射光强度; $\alpha = \max[\theta, \theta]$, $\beta = \min[\theta, \theta]$ 。 $\theta, \theta, \phi_r, \phi_i$ 的关系如图 1 所示。

由图 1 所示,在图像拍摄过程中,很多情况下,光源方向与拍摄方向相同,例如以闪光灯作为光源,则 $\alpha = \beta = \theta = \theta = \theta$, 可对 Oren-Nayar 模型进行改进,得到

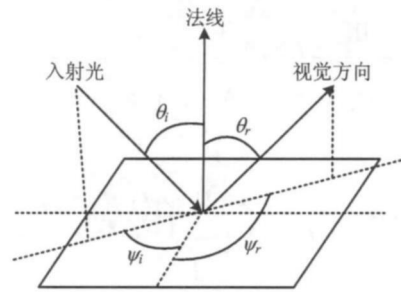


图1 反射角度关系图

$$L_r(\theta; \sigma) = \left[\frac{\rho}{\pi} L_i \right] (A \cos \theta + B \sin^2 \theta), (2)$$

即得到改进的漫反射模型

$$L_d = \left[\frac{\rho}{\pi} L_i \right] (A \cos \theta + B \sin^2 \theta)。 (3)$$

在本文研究的改进光照模型中,采用式(3)计算光的漫反射分量。

1.2 光照镜面反射模型

镜面反射模型用来描述物体表面对反射光产生镜面反射而投向观察者眼中的光亮度,一些图像中特别亮的“高光区”是光源在物体表面产生的镜面反射的结果。光照镜面反射模型是在电磁波传播理论的基础上推导出来的,但模型的数学表达式复杂,参数过多,难以直接用于方程组的逆向计算。Torrance-Sparrow 假设物体表面平面斜率分布函数符合高斯分布,提出一种简单的镜面反射光照模型^[10]

$$L_s = G_s L_i \frac{\rho}{\pi} e^{-\varphi/\sigma^2}。 (4)$$

式中: φ 为表面微平面的法线方向与表面平均法向的夹角, $\varphi = \arccos(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})$; 单位向量 \mathbf{H} 可近似表示为 $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{L} + \mathbf{V}}{2}$, \mathbf{V} 为视觉方向, \mathbf{L} 为光源方向; G_s 为几何衰减因子,取值范围为 $[0.8, 1]$; L_s 为镜面反射光照强度。镜面反射模型的推导原理决定了该模型不能很好地表示光的漫反射。

1.3 改进的光照模型

实际物体表面一般为非理想漫反射表面,在光照反射现象中,当光照射到物体表面时,反射光中除了漫反射分量,还包含镜面反射分量。当物体表面粗糙较大时,镜面反射分量对图像表面三维重构的影响比较小,在描述光照现象时可以忽略;相反,当物体表面粗糙较小时,镜面反射分量较大,不能忽略。上述推导的改进漫反射模型和镜面反射模型都

是独立的光照模型, 都可以应用 SFS 方法得到相应的表面三维形状。为了吸取各自的优点和弥补它们的不足, 同时提高物体表面三维重构的精度, 分别对式(3)的漫反射模型和式(4)镜面反射模型进行线性叠加, 提出完整的改进光照模型:

$$I = L_d + L_s = L_i K_d \frac{\rho}{\pi} (A \cos \theta + B \sin^2 \theta) + L_i K_s \frac{\rho}{\pi} G_s e^{-(\varphi_0)^2} \quad (5)$$

式中: K_d 为漫反射系数; K_s 为镜面反射系数; ρ 为入射光亮度, 可以根据实际物体表面的粗糙度和表面反射率确定, 需要满足条件 $L_d + L_s = 1$, 可以根据实际情况调整漫反射系数和镜面反射系数。

由以上对改进光照模型描述, 可以得出改进光照模型具有以下特点: ①根据图像拍摄的特点改进漫反射分量; ②依据所拍摄物体自身的特点, 实现镜面反射分量和漫反射分量的线性叠加, 提高重构精度; ③所采用的镜面反射光照模型, 表达式相对简单, 有利于求解。

2 改进光照模型求解

要完成采用改进光照模型, 通过 SFS 方法对图像进行三维重构, 还必须对光照模型进行求解, 根据文献[11]的划分标准, SFS 三维重构的求解方法主要分为最小化方法、传播方法、局部方法和线性化方法四种类型, 其中线性化方法没有非线性变换等一些复杂步骤, 求解相对简单且速度快。本研究采用线性化方法对改进的光照模型求解。以表面梯度 (p, q) 为变量, 为了提高线性化函数中的高度 Z 值精度, 使用有限差分法离散 p, q , 再采用 Jacobi 迭代法求解。由式(5)可转化为线性化反射函数:

$$R(p, q) = L_i K_d \frac{\rho}{\pi} (A \cos \theta + B \sin^2 \theta) + L_i K_s \frac{\rho}{\pi} G_s e^{-(\varphi_0)^2} \quad (6)$$

$(-p, -q, 1)$ 为物体表面点的方向向量, $p = \frac{\partial z}{\partial x}, q = \frac{\partial z}{\partial y}, (-p_0, -q_0, 1)$ 为光源方向向量, Z 为物体表面的高度, θ 为这两个向量的夹角, 则

$$\cos \theta = \frac{(1 + p_0 p + q_0 q)}{\sqrt{1 + p_0^2 + q_0^2} \sqrt{1 + p^2 + q^2}} \quad (7)$$

然后 p, q 采用下面差分格式逼近,

$$p = \frac{\partial z}{\partial x} = Z(i, j) - Z(i-1, j), \quad (8)$$

$$q = \frac{\partial z}{\partial y} = Z(i, j) - Z(i, j-1). \quad (9)$$

式中 $Z(i, j)$ 是 (i, j) 点处的高度值, 把式(8)和式(9)代入式(6), 然后重新定义一个函数, 得到式(10),

$$f(R(i, j), Z(i, j), Z(i-1, j), Z(i, j-1)) \approx Z^{n-1}(i, j-1)f(n-1) + (Z(i, j) - Z^{n-1}(i, j)) \frac{\partial f(n-1)}{\partial Z(i, j)} + (Z(i-1, j) - Z^{n-1}(i-1, j)) \frac{\partial f(n-1)}{\partial Z(i-1, j)} + (Z(i, j-1) - Z^{n-1}(i, j-1)) \frac{\partial f(n-1)}{\partial Z(i, j-1)} \quad (10)$$

式中:

$$f(n-1) = f(R(i, j), Z^{n-1}(i, j), Z^{n-1}(i-1, j), Z^{n-1}(i, j-1)), \quad (11)$$

对一幅 $N \times N$ 的图像, 就有 N^2 个上述等式, 采用 Jacobi 迭代法求解, 最终得到每个点的高度迭代约束公式

$$Z^n(i, j) = Z^{n-1}(i, j) + \frac{-f(Z^{n-1}(i, j))}{\frac{d}{dZ}f(Z^{n-1}(i, j))} \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} \frac{d}{dZ(x, y)}f(Z^{n-1}(i, j)) &= -1 \times ((A - 2B \cos \theta) \\ &L_i K_d D_d + L_i K_s \frac{\rho}{\pi} G_s \frac{2\varphi_0}{\sigma^2} e^{-(\varphi_0)^2} D_s), \quad (13) \\ D_d &= \frac{p_0 + q_0}{\sqrt{p_0^2 + q_0^2 + 1} \sqrt{p^2 + q^2 + 1}} - \\ &\frac{(p+q)(pp_0 + qq_0 + 1)}{\sqrt{p_0^2 + q_0^2 + 1} \sqrt{p^2 + q^2 + 1}^3}, \quad (14) \\ D_s &= \frac{1}{\sqrt{1 - (\text{Unit } N \cdot \text{Unit } H)^2}} \\ &\left[\frac{(p_h + q_h)(1 + p^2 + q^2) - (p+q)(1 + pp + qq)}{\sqrt{1 + p_h^2 + q_h^2} \sqrt{p^2 + q^2 + 1}^3} \right]. \quad (15) \end{aligned}$$

式中 N, H 分别为 $N(-p, -q, 1), H(-p_h, -q_h, 1)$, 且

$$\text{Unit } N \cdot \text{Unit } H = \frac{1 + p_h p + q_h q}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{p_h^2 + q_h^2 + 1}} \quad (16)$$

3 基于改进光照模型下的三维重构结果及比较

根据本文所提出的改进光照模型, 采用上述

求解结果, 编写相应的程序。为比较和验证采用改进光照模型在解决 SFS 问题上的改进效果, 以文献[5]、文献[9] 和文献[12] 中的金属半球图像为例, 分别采用基于 Lambert 模型、Oren-Nayar 光照模型和改进光照模型, 对金属半球图像进行三维重构, 在改进光照模型中取 $\sigma = 0.3$, $K_d = 0.8$, $K_s = 0.2$, $G_s = 0.88$, 结果如图 2~ 图 5 所示。

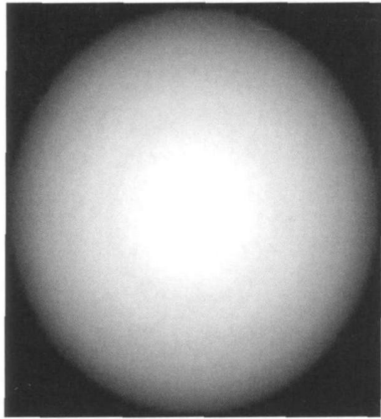


图2 金属球图像^[5,9,12]

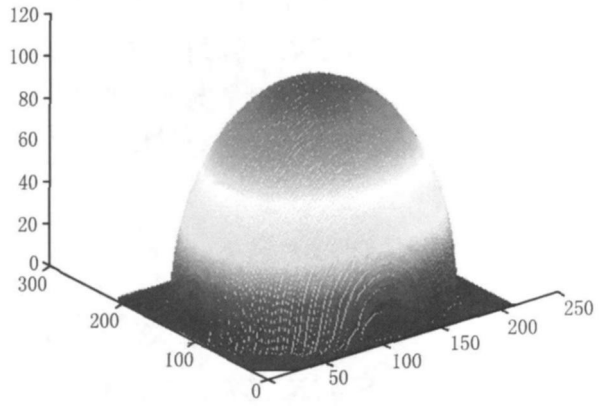


图5 基于改进光照模型的金球图像三维重构结果
重构后的对应误差分别如图 6~ 图 8 所示。

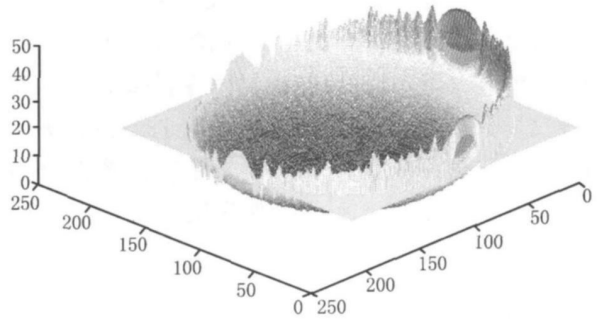


图6 基于Lambert模型的金球图像三维重构误差

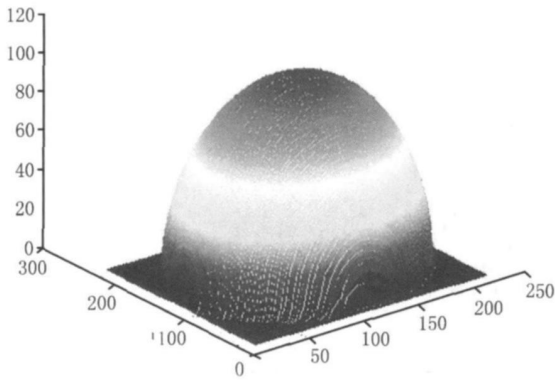


图3 基于Lambert模型的金球图像三维重构结果

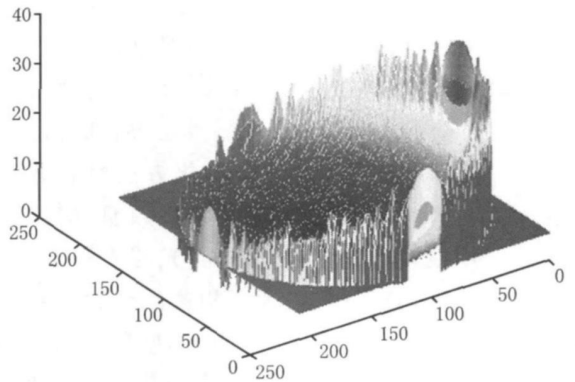


图7 基于Oren-Nayar模型的金球图像三维重构误差

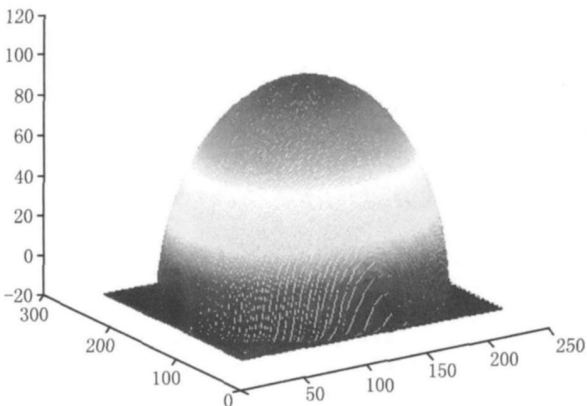


图4 基于Oren-Nayar模型的金球图像三维重构结果

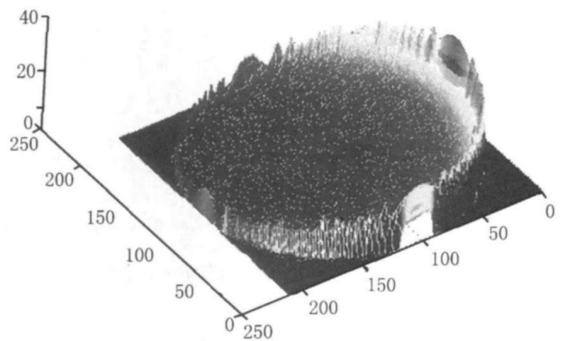


图8 基于改进光照模型的金球图像三维重构误差

分别计算不同光照模型重构金属半球表面的相对误差,假设图像大小为 $m \times n$,误差公式采用

$$E = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{|z^* - z|}{z} \quad (17)$$

式中: z^* 为表面计算高度值, z 为表面真实高度值。由式(17)计算出基于不同光照模型对金属半球表面重构后的误差,如表 1 所示。

表 1 基于不同光照模型的球面重构误差结果

重构球面所采用的光照模型	重构误差/%
基于 Lambert 模型	20.98
基于 Oren-Nayar 模型	20.66
基于改进光照模型	12.19

由表 1 比较得出,基于改进的光照模型的重构表面在重构精度上高于基于 Lambert 模型和基于 Oren-Nayar 模型的重构表面,可达到改进的目的。

4 结束语

本文通过对光照反射现象的分析,将用于 SFS 方法的反射光分为漫反射光分量和镜面反射光分量两部分,并以此为基础提出一种改进光照模型。在 SFS 原理基础上,对改进光照模型进行求解,并对求解过程及其具体算法进行了描述。最后,应用该方法对金属半球表面进行了三维重构,通过与其他模型得到的结果相比,基于改进光照模型得到的重构高度误差降低为 12.19%,证明了改进光照模型的有效性,达到了改进的目的。

参考文献:

[1] HORN B K P. Height and gradient from shading[J]. International Journal of Computer Vision, 1990, 5(1): 37-75.
 [2] GAO Yuefang, LUO Fei, GAO Jianzhong. A shape from shading algorithm and its application[C]//Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Control and Automation. Washington, D. C., USA: IEEE Computer Society Press, 2007: 2133-2135.

[3] ZHANG Li, YIP A M, TAN C L. Shape from shading based on lax-friedrichs fast sweeping and regularization techniques with applications to document image restoration[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, D. C., USA: IEEE, 2007: 1-8.
 [4] KONG Fanhui, WANG Yongxin. Reconstruction of solder joint surface based on shape from shading[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Natural Computation. Washington, D. C., USA: IEEE Computer Society Press, 2007: 58-62.
 [5] HAO Ping, GUO Dongming, KANG Renke, et al. A more general illumination model for surface reconstruction [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Mechatronics and automation. Washington, D. C., USA: IEEE Computer Society Press, 2004: 626-631.
 [6] PRADOS E, FAUGERAS O. Shape from shading: a well posed problem? [C]//Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, D. C., USA: IEEE Computer Society Press, 2005: 870-877.
 [7] SHAHEEN G, YUN Z. Shape from shading of SAR imagery in fourier space[C]//Proceedings of IGARSS 2007. Washington, D. C., USA: IEEE Computer Society Press, 2007: 835-837.
 [8] NAYAR S K, IKEUCHI K, KANADE T. Surface reflection: physical and geometrical perspectives[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(7): 611-634.
 [9] 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.
 [10] COOK R L, TORRANCE K E. A reflectance model for computer graphics [J]. Computer Graphics, 1981, 15(3): 307-316.
 [11] ZHANG Ruo, TSAI P S, CRYER J E, et al. Shape from shading: a survey[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(8): 119-131.
 [12] AHMED A H, FARAG A A. A new formulation for shape from shading for non-Lambertian surfaces[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, D. C., USA: IEEE Computer Society Press, 2006: 1817-1824.