

基于粗糙表面模型的三维形貌恢复研究

马银平, 李建英, 宣亮亮

(南昌航空大学 自动化学院, 江西 南昌 330063)

摘 要:文中提出了一种针对粗糙物体的表面反射模型,即用 Oren - Nayar 模型代替通用的朗伯体表面反射模型(Lambertian surface reflection model),并基于透视投影从明暗恢复形状(shape from shading),对图像进行三维重建,此三维重建具有很高的现实意义。实验用该模型对两幅较粗糙的真实图像进行重建并与在朗伯体模型下得到的结果进行比较,实验结果表明对于粗糙物体文中方法能得到较好的恢复效果,说明本 SFS 方法是有效且收敛的。

关键词:从明暗恢复形状;朗伯体表面反射模型;偏微分方程;哈密顿雅各比方程

中图分类号: TP39; TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1673 - 629X(2009)07 - 0102 - 03

Study on 3D Shape Recovery Based on Rough Surface Model

MA Yin-ping, LI Jian-ying, XUAN Liang-liang

(College of Automatization, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In this paper, proposes a new surface reflection model that is suitable for rough objects. Lambertian surface reflection model is replaced by Oren - Nayar reflection model. Based on perspective projection model of shape from shading, the images are reconstructed in 3D shape. It also has a real high practical significance. It utilizes the model to reconstruct two real images. And in comparison with the results of Lambertian model, they have perferable performance in the experiments. Hence, the SFS method in this paper is effective and converged.

Key words: shape from shading; Lambertian surface reflection model; partial differential equation; Hamilton - Jacobi equation

0 引言

由二维到三维图像的表面重建^[1,2]是计算机视觉领域中的一个热门、有价值、有意义并且有相当难度的课题,它在工业生产线自动化测量、医学、SAR 图像地形测量及月球、星球表面形貌恢复等方面都具有广泛而深远的应用价值。对于实际的图像而言,其表面点图像亮度受到如光源、物体表面材质和形状、摄像机位置(或视觉方向)和参数等多个因素的影响,所以为简化问题,传统 SFS 算法均做如下假设^[3]:

- (1) 物体表面反射模型为朗伯体反射模型;
- (2) 光源为无限远处点光源;
- (3) 成像几何关系为正交投影。

然而事实上很多情况并不完全满足朗伯体表面反射模型和正交投影,因此常用的三维重建方法并不能运用到所有物体的分析,故将物体表面一致假设为朗伯体表面反射模型和正交投影得到的三维重建结果与

实际情况会有一定的误差,甚至得到错误的结果。因此,提出基于粗糙物体反射模型的三维重建,也就是说将粗糙物体的图像表面反射模型理解成 Oren - Nayar 反射模型进行实验,为今后进一步的研究和实践工作提供依据。

1 粗糙物体模型

Oren 和 Nayar^[4]在 1995 年提出了一种对于粗糙表面非常适用的漫反射模型,这里的粗糙是指形状变化剧烈、不平坦的物体。粗糙物体可以看成由很多不在一个平面上的小片面组成,而每个小片面又可以看成是平坦的小片面,小片面的长度相对于物体的长度来说要短得多,然后再假定所有小片面符合朗伯体反射模型。根据 Oren - Nayar 模型,得到下列亮度方程:

$$L_r(\theta_i, \theta_r, \phi_r - \phi_i, \sigma) = \frac{\rho}{\pi} L_i \frac{\cos(\theta_i)}{r^2} \{A + B \max[0, \cos(\phi_r - \phi_i) \sin(\alpha) \tan(\beta)]\} \quad (1)$$

式中, θ_i, ϕ_i 分别为光源方向的倾角和偏角, θ_r, ϕ_r 分别为反射方向的倾角和偏角, $1/r^2$ 为亮度衰减因子, σ 为表面的粗糙参数, ρ 为表面反照率, L_i 为入射光亮度, L_r 为反射光亮度, 如图 1 所示。这里研究基于统一的

收稿日期: 2008 - 10 - 31; 修回日期: 2009 - 01 - 05

基金项目: 江西省自然科学基金(0511063)

作者简介: 马银平(1963 -), 女, 河南人, 教授, 研究方向为 CAD 及图形图像处理。

σ, A 和 B 是仅仅取决于 σ 的无穷小量, $A = 1.0 - 0.5\sigma^2/(\sigma^2 + 0.33)$, $B = 0.45\sigma^2/(\sigma^2 + 0.099)$, 角度 α 和 β 分别为光源和反射方向倾角的最大值和最小值, 即 $\alpha = \max[\theta_i, \theta_r]$, $\beta = \min[\theta_i, \theta_r]$ 。特别地, 当 $\sigma = 0$ 时该模型简化成为朗伯体反射模型。

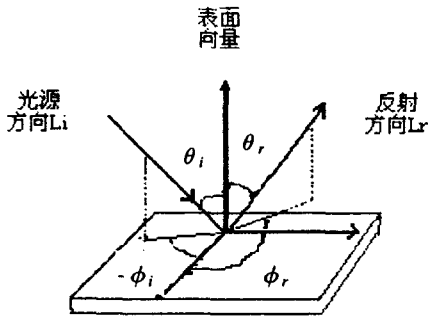


图1 光源和反射方向图

2 算法模型的建立

2.1 偏微分方程

在 $\bar{\Omega} \rightarrow R^3$ 域定义表面向量 S 为: $S(x) = \frac{fu(x)}{\sqrt{\|x\|^2 + f^2}}(x, -f)$, 其中 Ω 是 R^2 在图像域的一个开区间集合, f 为焦距, $u(x)$ 为 S 的未知量。在 x 点, S 向量和光源方向单位向量分别为:

$$n(x) = [f \nabla u(x) - \frac{fu(x)}{\|x\|^2 + f^2} x, \nabla u(x) \cdot x + \frac{fu(x)}{\|x\|^2 + f^2} f] \quad (2)$$

$$L(S(x)) = 1/\sqrt{\|x\|^2 + f^2}(-x, f) \quad (3)$$

文中研究基于透视投影的图像并假定光源位于视觉中心位置, 故有 $\theta_r = \theta_i = \theta$, $\phi_r = \phi_i$, 并且为简化问题, 取 $\rho = 1$, 故式(1)可简化成以下方程^[3]:

$$I(x) = I_D(\theta, \sigma) = \frac{A \cos(\theta) + B \sin^2(\theta)}{r^2} \quad (4)$$

为将上式用函数 S 的向量和光源方向单位向量表示, 用焦距和函数 u 来表示衰减因子, $r = fu(x)$, 并将 $\cos(\theta)$ 用点乘积 $L(S(x)) \cdot \frac{n(x)}{\|n(x)\|}$ 替代, 得到以下偏微分方程:

$$f^2 u^2 I(x) (W(\nabla u, x) + u^2) - Au \sqrt{W(\nabla u, x) + u^2} - BW(\nabla u, x) = 0 \quad (5)$$

其中 $W(\nabla u, x) = (f^2 \|\nabla u\|^2 + (\nabla u, x)^2) \times (\|x\|^2 + f^2)/f^2$ 。因为 u 为非负数所以可以作相应转变 $v = \ln(u)$, 故式(5)可简化为:

$$-e^{-2v} + I(x) f^2 \frac{W(\nabla u, x) + 1}{A \sqrt{W(\nabla u, x) + 1} + BW(\nabla u, x)} = 0 \quad (6)$$

2.2 算法的具体实现

上式是哈密顿雅各比(Hamilton-Jacobi)方程。

而哈密顿雅各比方程一般情况都没有唯一解, 所以为求得唯一解, 文中采用粘度解方法^[5], 由式(6)得:

$$\begin{cases} -e^{-2v} + I f^2 \frac{W(\nabla v, x) + 1}{A \sqrt{W(\nabla v, x) + 1} + BW(\nabla v, x)} \\ = 0, \quad \forall x \in \Omega \\ v(x) = \Psi(x), \quad \forall x \in \partial\Omega \end{cases} \quad (7)$$

再将上式改写成:

$$\begin{cases} -e^{-2v} + H(\nabla v, x) = R(x), \quad \forall x \in \Omega \\ v(x) = \Psi(x), \quad \forall x \in \partial\Omega \end{cases} \quad (8)$$

其中 $R(x) = 1$, $H(\nabla v, x) =$

$$\frac{I(x) f^2 + W(\nabla v, x) [B + I(x) f^2] + A \sqrt{W(\nabla v, x) + 1}}{A \sqrt{W(\nabla v, x) + 1} + BW(\nabla v, x)}。$$

将 Ω 区域点 (x_i, y_j) 离散化, 其中 $i = 0, 1, \dots, m_1, m_1 + 1$; $j = 0, 1, \dots, m_2, m_2 + 1$; 并令网格大小为 $(\Delta x, \Delta y)$, 得到未知函数 $v(x)$ 的近似解: $V(i, j) = v(i\Delta x, j\Delta y)$ 采用 2 维 Lax-Friedrichs 哈密顿算符^[6], 近似解更改为:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{-1}{\frac{\sigma_x}{\Delta x} + \frac{\sigma_y}{\Delta y}} e^{-2V_{ij}^{n+1}} + V_{ij}^{n+1} \right] = \left[\frac{1}{\frac{\sigma_x}{\Delta x} + \frac{\sigma_y}{\Delta y}} \right] \cdot \\ & \left[R - H \left(\frac{V_{i+1,j} - V_{i-1,j}}{2\Delta x}, \frac{V_{i,j+1} - V_{i,j-1}}{2\Delta y} \right) \right] + \\ & \left[\frac{1}{\frac{\sigma_x}{\Delta x} + \frac{\sigma_y}{\Delta y}} \right] \left[\sigma_x \frac{V_{i+1,j} + V_{i-1,j}}{2\Delta x} + \sigma_y \frac{V_{i,j+1} + V_{i,j-1}}{2\Delta y} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $\sigma_x \geq \max_{p,q} |\frac{\partial H}{\partial p}|$, $\sigma_y \geq \max_{p,q} |\frac{\partial H}{\partial q}|$, $p = \frac{\partial v}{\partial x}$, $q = \frac{\partial v}{\partial y}$ 。因为上式对 V_{ij} 是非线性的, 需要用牛顿迭代法求解。将方程右边式子用 b 表示, 并令 $a = -1/(\frac{\sigma_x}{\Delta x} + \frac{\sigma_y}{\Delta y})$, 式(9)简化为:

$$g(t) = ae^{-2t} + t - b = 0 \quad (10)$$

将上式两边对 t 求得:

$$g'(t) = -2ae^{-2t} + 1 \quad (11)$$

初始化 $t^0 = V_{ij}^n$, 则由牛顿迭代法得:

$$t^{k+1} = t^k - g(t^k)/g'(t^k) \quad (12)$$

经过数次迭代后即可得到式(10)的较精确解。

3 实验结果

文中对两幅图像进行预处理后采用上述方法进行灰度重建, 在 Matlab 软件环境下编程实现。

3.1 实验一 古董重建

古董重建如图 2 所示。

3.2 实验二 螺丝钉重建

螺丝钉的重建如图 3 所示。

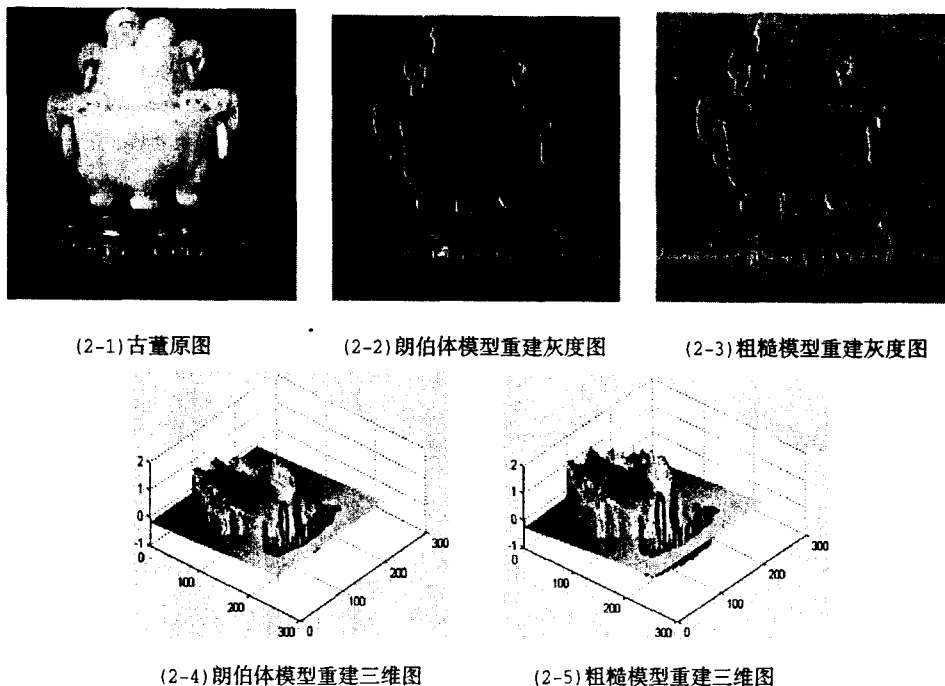


图 2 古董重建图

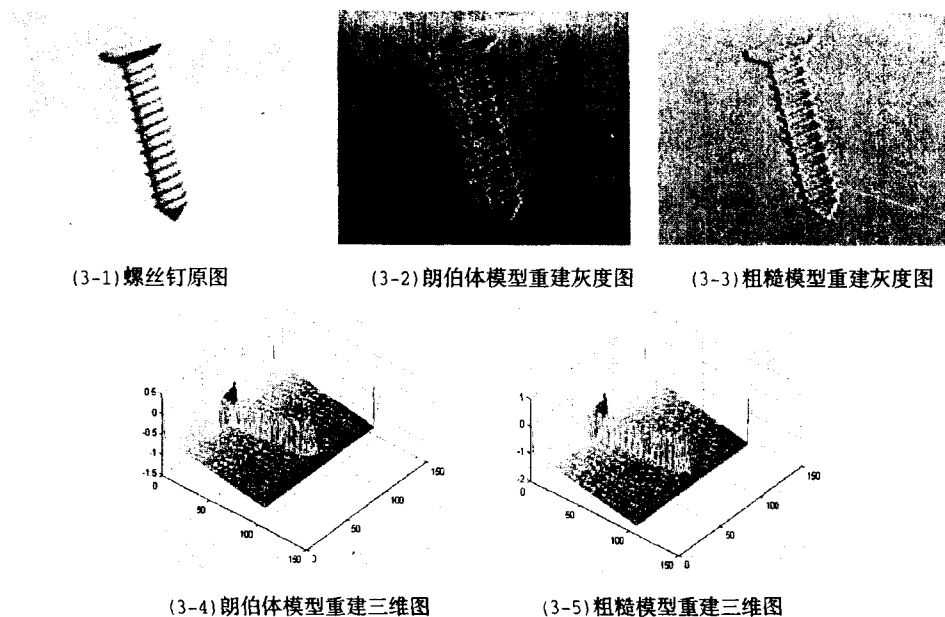


图 3 螺丝钉重建图

从重建情况来看,该算法对粗糙图像是有效的。古董和螺丝钉都不是平滑的物体,在重建时粗糙度分别取 0.4 和 0.5。与在朗伯体模型下结果比较,文中方法重建的灰度图伪边缘要少,对重建结果影响更小,得到效果更好。

4 结束语

文中提出一种非朗伯体反射模型——针对较粗糙

物体的模型,加入衰减因子 $1/r^2$ 并在透视投影下采用牛顿迭代法求解,并得到较满意的重建效果。今后希望可以进一步合并两种分别针对粗糙表面和光滑表面的模型,并采用合并后的模型进行重建实验,期望可以将 SFS 算法运用到既有粗糙部分又有光滑部分的物体,从而扩大 SFS 算法的运用范围。

参考文献:

- [1] Rouy E, Tourin A. A viscosity solutions approach to shape from shading [J]. SIAM J. Numerical Analysis, 1992, 29 (3): 867 - 884.
- [2] 李健,梁琨.基于明暗恢复法的三维重建算法分析[J].微计算机信息,2006,8(1): 202 - 204.
- [3] 廖熠,赵荣椿.从明暗恢复形状(SFS)的几类典型算法分析与评价[J].中国图像图形处理学报,2001,6(10): 953 - 961.
- [4] Oren M, Nayar S K. Generalization of the Lambertian Model and Implications for Machine Vision[J]. Int'l. Comp. Vis, 1995, 14(3): 227 - 251.
- [5] 熊琰,龚华军,沈晔青.一种快速有效的彩色图像边缘检测方法[J].计算机技术与发展,2007,17(4): 161 - 163.
- [6] Ragheb H, Hancock E R. Surface Radiance Correction for Shape - from - Shading[J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 2004, 9: 12 - 14.