

# 基于 Phong 模型的明暗恢复形状的新算法<sup>\*</sup>

赵中滨, 张志毅, 邢彩燕

(西北农林科技大学信息工程学院, 陕西 西安 712100)

**摘要:**针对传统的混合表面形状恢复算法存在较大误差的问题,提出一种透视投影下从单幅图像混合表面明暗信息恢复形状的新算法。采用 Phong 反射模型来描述物体表面反射特性,假设光源处于相机的光心处,建立透视投影下的图像辐照度方程。然后由辐照度方程构造包含物体深度信息的 Hamilton-Jacobi 偏微分方程,引入局部高阶 LLF 通量分裂格式和五阶 WENO 格式逼近微分方程的粘性解,最终得到物体表面三维形状。实验结果表明,与传统算法相比,新算法的恢复高度的最大误差和平均误差均显著降低。

**关键词:**明暗恢复形状; Phong 反射模型; 透视投影; 粘性解

**中图分类号:** TP391.4

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1007-130X.2018.03.013

## A new shape-from-shading algorithm based on Phong model

ZHAO Zhong-bin, ZHANG Zhi-yi, XING Cai-yan

(College of Information Engineering, Northwest A & F University, Xi'an 712100, China)

**Abstract:** Focusing on the big error in traditional Shape-From-Shading (SFS) algorithms for hybrid surfaces, a new SFS algorithm for a single image under hybrid surfaces based on perspective projection is proposed. In this paper, the Phong reflection model is used to describe the reflectance property of the surfaces. Assuming that the light source is located at the camera's optical center, the image irradiance equation is established for this model. Then, the image irradiance equation is transformed into the Hamilton-Jacobi Partial Differential Equation (PDE) including the shape information of the surfaces. Using the high-order Lax-Friedrichs (LLF) flux splitting scheme and five-order Weighted Essentially Non-Oscillatory (WENO) scheme approximates the viscosity solution of the PDE. Finally, the heights of three-dimensional surface are obtained. Experimental results show that the maximum error and the mean error of 3D surface recovery of the new algorithm are significantly reduced, compared with the traditional algorithm.

**Key words:** shape from shading; Phong reflection model; perspective projection; viscosity solution

### 1 引言

基于二维图像信息的三维形状恢复技术,是当今计算机视觉领域的前沿研究问题,它根据真实场景的数据重建出具有准确几何信息和照片真实感

的三维模型,这些模型适用于考古、医学研究、工业测量等领域,有良好的应用前景<sup>[1-3]</sup>。明暗恢复形状 SFS(Shape from Shading)是由单幅图像恢复物体三维形状的一种重要方法,其原理是通过分析物体二维图像的灰度信息,重构物体表面各点的法向量,进而获取物体表面几何形状的三维信息。

\* 收稿日期:2016-08-16;修回日期:2016-12-07

基金项目:国家 863 计划(2013AA10230402);国家自然科学基金(61303124)

通信地址:712100 陕西省西安市杨凌农业示范区西北农林科技大学信息工程学院

Address: College of Information Engineering, Northwest A & F University, Yangling District, Xi'an 712100, Shaanxi, P. R. China

SFS问题是在20世纪70年代由Horn等人<sup>[4]</sup>对月面进行三维形状重构时提出的,经过40多年发展,出现了许多经典算法,主要有最小化方法、演化方法、局部分析法、线性化方法等<sup>[5]</sup>。然而,传统方法一般假设物体表面反射为朗伯体反射,但实际物体的表面往往是含有漫反射和镜面反射的混合表面<sup>[6]</sup>,两者之间存在较大误差;并且传统的方法大都基于正交投影,与实际摄像机所采用的透视投影也有很大差别<sup>[7-9]</sup>。

为解决混合表面的三维形状恢复问题,本文提出了一种基于Phong混合模型的明暗恢复形状的新算法。算法采用Phong反射模型来描述物体表面反射特性,摄像机采用透视投影模型,减少因模型简化而产生的重构误差;将辐照度方程转换成包含物体深度信息的Hamilton-Jacobi方程,引入局部高阶LLF(Local Lax Friedrichs)通量分裂格式<sup>[10]</sup>和五阶WENO(Weighted Essentially Non-Oscillatory)格式<sup>[11]</sup>逼近微分方程的粘性解,提高重建结果的精度。

## 2 Phong 反射模型

Phong<sup>[12]</sup>是1975年提出的反射模型,它认为物体表面上点的反射光的光强包括环境光分量、漫反射光分量和镜面反射光分量,可用式(1)表达如下:

$$I = k_a I_a + \frac{1}{r^2} (k_d I_d \cos \theta + k_s I_s (\cos \varphi)^n) \quad (1)$$

其中,  $I_a$ 、 $I_d$  和  $I_s$  分别是环境光分量、漫反射分量和镜面反射分量,  $k_a$ 、 $k_d$  和  $k_s$  分别为环境光、漫反射光和镜面反射光的反射系数,且  $k_a + k_d + k_s \leq 1$ 。 $\theta$  是平面法向量和光源方向向量间的夹角,  $\varphi$  是镜面反射光线和视线方向的夹角。 $n$  为镜面反射光的汇聚指数(与物体表面的光滑度有关),  $r$  是物体表面到光源的距离。Phong 反射几何模型如图1所示。

因环境光分量很小,略去不计时,Phong 模型可被简化为漫反射和镜面反射的一种线性组合,其中漫反射部分使用朗伯体模型来描述实际物体反射,误差很大。Oren 和 Nayar<sup>[13]</sup> 为了提高精度,给出了适用于粗糙表面的漫反射模型,其亮度方程为:

$$I = \cos(\theta_i) (A + B \sin(\alpha) \tan(\beta) \max[0, \cos(\varphi_i - \varphi_r)]) \quad (2)$$

其中,  $A = 1 - \frac{0.5\sigma^2}{\sigma^2 + 0.33}$ ,  $B = \frac{0.45\sigma^2}{\sigma^2 + 0.09}$ ,  $\alpha = \max(\theta_i, \theta_r)$ ,  $\beta = \min(\theta_i, \theta_r)$ ,  $\theta_i$ 、 $\varphi_i$  和  $\theta_r$ 、 $\varphi_r$  分别是光

源方向向量、视线方向向量的天顶角、方位角,  $\sigma$  是表面粗糙度系数。

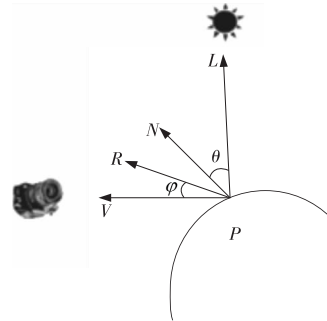


Figure 1 Geometric model of Phong reflection

图1 Phong 反射的几何模型

用Oren-Nayar反射模型公式(2)代替Phong模型公式(1)中的漫反射部分,可得到新的Phong模型:

$$I = k_a I_a + \frac{1}{r^2} [k_d I_d \cos(\theta_i) (A + B \sin(\alpha) \tan(\beta) \max[0, \cos(\varphi_i - \varphi_r)]) + k_s I_s (\cos \varphi)^n] \quad (3)$$

## 3 透视投影下的辐照度方程

设光源位置在相机的光心  $O$  处,  $f \geq 0$  为摄像机的焦距,像平面位于  $Z = -f$  处,  $P$  为物体表面上任一点,  $u(\mathbf{x}) > 0$  代表物体表面上的点沿光线投射方向的深度信息  $\mathbf{x} = [x_1, x_2]$ ,  $r$  为光心到  $P$  点的距离,  $m$  是投射光线与像平面的交点,  $m'$  是以光心为球心,以  $f$  为半径的球与  $PO$  连线的交点,成像模型如图2所示。

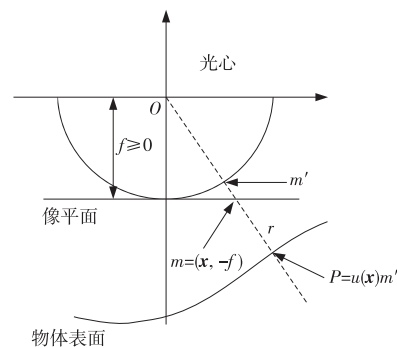


Figure 2 Perspective projection with a point source located at the optical center of the camera

图2 光源位于光心处的透视投影模型

因为光源位于摄像机的光心处,所以  $\varphi = 2\theta_i$ ,  $\theta_i = \theta_r = \alpha = \beta$ ,  $\varphi_i = \varphi_r$ , 为简化问题,取  $k_a = 0$ ,  $I_d = I_s = 1$ ,  $\alpha = 1$ , 可将方程(3)简化为:

$$I(\mathbf{x}) = \frac{1}{r^2} [k_d A \cos \theta_i + (k_d B - 2k_s) \sin^2 \theta_i + k_s] \quad (4)$$

设实数集  $\mathbf{R}^2$  上的开集  $\Omega$  表示图像的大小,则物体表面的形状可以表示为:  $S(\mathbf{x}) = \frac{fu(\mathbf{x})}{\sqrt{|\mathbf{x}^2| + f^2}}(\mathbf{x}, -f), \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \in \Omega$ , 物体表面上任意一点  $P$  处的法向量  $n(\mathbf{x})$  是:

$$n(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} f\nabla u(\mathbf{x}) - \frac{fu(\mathbf{x})}{|\mathbf{x}|^2 + f^2}\mathbf{x} \\ \nabla u(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{x} + \frac{fu(\mathbf{x})}{|\mathbf{x}|^2 + f^2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,  $\nabla u(\mathbf{x})$  是  $u(\mathbf{x})$  的梯度。

光源方向向量  $L(S(\mathbf{x}))$  为:

$$L(S(\mathbf{x})) = \frac{1}{\sqrt{|\mathbf{x}|^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -\mathbf{x} \\ f \end{bmatrix} \quad (6)$$

从式(5)和式(6)可以得到夹角:

$$\theta_i = \arccos(L(S(\mathbf{x})) \cdot \frac{n(\mathbf{x})}{|n(\mathbf{x})|})$$

$$\arccos\left(\frac{Q(\mathbf{x})}{\sqrt{f^2|\nabla v(\mathbf{x})|^2 + (\nabla v(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{x})^2 + Q(\mathbf{x})^2}}\right) \quad (7)$$

其中,  $Q(\mathbf{x}) = \sqrt{\frac{f^2}{|\mathbf{x}|^2 + f^2}}$ , 因为  $r = fu(\mathbf{x})$ , 令  $v = \ln(u)$ , 可从式(4)得到式(8)所示的偏微分方程:

$$I(\mathbf{x}) = \frac{1}{f^2 e^{2v}} \left[ k_d A \frac{Q(\mathbf{x})}{F(\mathbf{x}, \nabla v)^{\frac{1}{2}}} + (k_d B - 2k_s) \frac{F(\mathbf{x}, \nabla v) - Q(\mathbf{x})^2}{F(\mathbf{x}, \nabla v)} + k_s \right] \quad (8)$$

其中,  $F(\mathbf{x}, \nabla v) = f^2 |\nabla v(\mathbf{x})|^2 + (\mathbf{x} \cdot \nabla v(\mathbf{x}))^2 + Q(\mathbf{x})^2$ ,  $\nabla v(\mathbf{x}) = [\varphi_x, \varphi_y]$ , 简记为  $\nabla v$ 。

式(8)对应的哈密顿函数为:

$$H(\mathbf{x}, \nabla v) = -e^{-2v} + I(\mathbf{x})f^2$$

$$\frac{1}{k_d A \frac{Q(\mathbf{x})}{F(\mathbf{x}, \nabla v)^{\frac{1}{2}}} + (k_d B - 2k_s) \frac{F(\mathbf{x}, \nabla v) - Q(\mathbf{x})^2}{F(\mathbf{x}, \nabla v)} + k_s} \quad (9)$$

#### 4 偏微分方程求解

考虑 Dirichlet 边界条件后,式(9)可以写为静态 Hamilton-Jacobi 方程:

$$\begin{cases} H(\mathbf{x}, \nabla v) = 0, \forall \mathbf{x} \in \Omega \\ v(\mathbf{x}) = \varphi(\mathbf{x}), \forall \mathbf{x} \in \partial\Omega \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $\varphi(\mathbf{x})$  是定义在  $\partial\Omega$  上的实值连续函数。

将图像区域  $\Omega = (1, m) \times (1, n)$  划分成离散网格点  $x_{i,j} = (ih_1, jh_2), i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ , 网格大小为  $(h_1, h_2)$ 。解静态 HJ 方程的两

个要点,一是选择与函数  $H$  相容的函数的通量分裂格式,另一个是确定一种离散差分形式对  $\varphi_x$  和  $\varphi_y$  进行的逼近。

引入高阶 LLF 通量分裂格式,即基于 Gauss-Seidel 迭代的通用的显式的更新格式:

$$\phi_{i,j}^{n+1} = \phi_{i,j}^n + (1/(\frac{\alpha_x}{h_x} + \frac{\alpha_y}{h_y})) [ -H(\frac{(\phi_x^-)_{i,j} + (\phi_x^+)_{i,j}}{2}, \frac{(\phi_y^-)_{i,j} + (\phi_y^+)_{i,j}}{2}) + \alpha_x \frac{(\phi_x^+)_{i,j} - (\phi_x^-)_{i,j}}{2} + \alpha_y \frac{(\phi_y^+)_{i,j} - (\phi_y^-)_{i,j}}{2} ] \quad (11)$$

其中,  $\alpha_x = \max_{x \in [x_{i-1}, x_{i+1}]} \left| \frac{\partial H}{\partial \phi_x} \right|$ ,  $\alpha_y = \max_{y \in [y_{i-1}, y_{i+1}]} \left| \frac{\partial H}{\partial \phi_y} \right|$ 。

为了提高式(11)中结果的精度,采用五阶 WENO 作为一阶导数  $\phi_x$  和  $\phi_y$  的近似:

$$(\phi_x^+)_{i,j} = w_0^+ p_{i,j} + w_1^+ p_{i+\frac{1}{2},j} + w_2^+ p_{i+1,j} \quad (12)$$

其中权重  $w$  和抛物线  $p_{i,j}$  定义为:

$$p_{i,j} = \frac{1}{2} z_{i-\frac{1}{2},j} - \frac{1}{2} z_{i+\frac{1}{2},j} - \frac{1}{6} z_{i,j}$$

$$p_{i,j+\frac{1}{2}} = \frac{1}{12} z_{i-\frac{1}{2},j} - \frac{4}{3} z_{i+\frac{1}{2},j} - \frac{5}{12} z_{i+\frac{3}{2},j}$$

$$p_{i+1,j} = \frac{3}{2} z_{i+\frac{1}{2},j} - \frac{1}{2} z_{i+\frac{3}{2},j} - \frac{1}{3} z_{i+1,j}$$

$$w_k^+ = \frac{\alpha_k^+}{\alpha_0^+ + \alpha_1^+ + \alpha_2^+}, \alpha_k^+ = \frac{C_k^+}{(\epsilon + IS_k^+)^2}, k = 0, 1, 2 \quad (13)$$

当  $C_0^+ = 0.6, C_1^+ = 0.2, C_2^+ = 0.2$  时取得最优权重<sup>[8]</sup>,  $\epsilon = 10^{-6}$  保证  $\alpha_k^+$  的分母不为零,光滑因子  $IS_k^+$  定义为:

$$IS_0 = \frac{13}{12} (p_{i,j})^2 + \frac{1}{4} (2z_{i+\frac{1}{2},j} - 2z_{i-\frac{1}{2},j} + p_{i,j})^2$$

$$IS_1 = \frac{13}{12} (z_{i-\frac{1}{2},j} - 2z_{i+\frac{1}{2},j} + 2z_{i+\frac{3}{2},j})^2 + \frac{1}{4} (z_{i-\frac{1}{2},j} - z_{i+\frac{3}{2},j})^2$$

$$IS_2 = \frac{13}{12} (p_{i+1,j})^2 + \frac{1}{4} (2z_{i+\frac{3}{2},j} - 2z_{i+\frac{1}{2},j} - p_{i+1,j})^2 \quad (14)$$

同样,我们可以得到  $(\phi_x^-)_{i,j}, (\phi_y^+)_{i,j}$  和  $(\phi_y^-)_{i,j}$ 。

算法流程如下:

(1)初始化:根据边界条件  $v(\mathbf{x}) = \phi(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in \partial\Omega$ , 对距离  $\partial\Omega$  小于或者等于  $\max(h_1, h_2)$  的网格点赋予精确值,这些值在迭代过程中保持不变;其他点赋予一个较大的正值,这个值比物体最高点的高度还要大,这些值在后续的迭代中更新。

(2)迭代:在第  $n+1$  步,使用式(11)对  $\phi_{i,j}$  进行更新,采用 Gauss-Seidel 方法从四个方向进行:

- ①  $i = 1:m, j = 1:n;$
- ②  $i = m:1, j = 1:n;$
- ③  $i = m:1, j = n:1;$
- ④  $i = 1:m, j = n:1.$

(3)停止条件:当满足  $|\varphi^{n+1} - \varphi^n| \leq \xi$  时停止迭代,其中  $\xi > 0$  为足够小的值。

## 5 实验结果

实验运行环境如下:CPU 为 Intel(R) Core (TM)i5-5200U, 2.20 GHz, RAM 为 4 GB。实验中,用合成图像和真实图像来评估本文算法的性能。首先,合成图像由物体的真实高度通过图 2 的反射模型生成,利用提出的算法进行恢复,并与真实数据进行比较来验证算法的精度;其次,对真实物体进行重建,并与 Frankot-Chellappa<sup>[14]</sup>、Prados-Faugeras<sup>[9]</sup>的方法进行比较。近几年的文献只是对 Prados-Faugeras 方法的偏微分求解部分进行改进<sup>[15]</sup>,光照模型和投影模型不变,辐照度方程和偏微分方程的推导也一致,本质上没有创新,恢复结果没明显提高,本文未做比较。

(1)合成图像的三维形状恢复。

在实验中使用花瓶和火山两个合成图像,真实

表面合成公式由 Yuen<sup>[16]</sup> 提供。对应的透视投影下的灰度图像由式(8)生成,参数  $k_d = 0.8, k_s = 0.05, \sigma = 0.2$ , 相机焦距 25 mm, 相机与物体所处平面距离为 250 mm, 图像分辨率为  $256 \times 256$ 。

图 3 是合成图像实验结果。

由图 3 结果可以看出,文献[9]算法适用范围小,其恢复的花瓶边缘存在较大误差,这是由于花瓶表面的边缘部分在灰度图像内灰度为 0,从其灰度图像不能恢复物体的边缘信息,花瓶存在着在透视投影下局部无法恢复的问题,而火山不存在这样的问题;文献[14]算法基于正交投影且反射模型为朗伯体模型,其恢复的花瓶、火山平均误差较大;本文算法采用改进的 Phong 反射模型,并引入高阶 LLF 通量分裂格式和五阶 WENO 格式来逼近图像辐照度方程的粘性解,较文献[9,14]算法恢复的三维形状高度的最大误差和平均误差有大幅度减少,且适用范围更广泛。

表 1 分别为两个例子的最大误差和平均误差的比较,可以看出,本文算法得到的结果比其他两种方法精度更高。表 2 为重建时间的比较,本文使用 Phong 反射模型,更符合实际拍摄图像,建立的辐照度方程比文献[9,14]的复杂,且为提高精度,引入高阶 LLF 通量分列格式和 WENO 逼近偏微分方程的粘性解,所以耗时较长。

(2)真实图像的三维形状恢复。

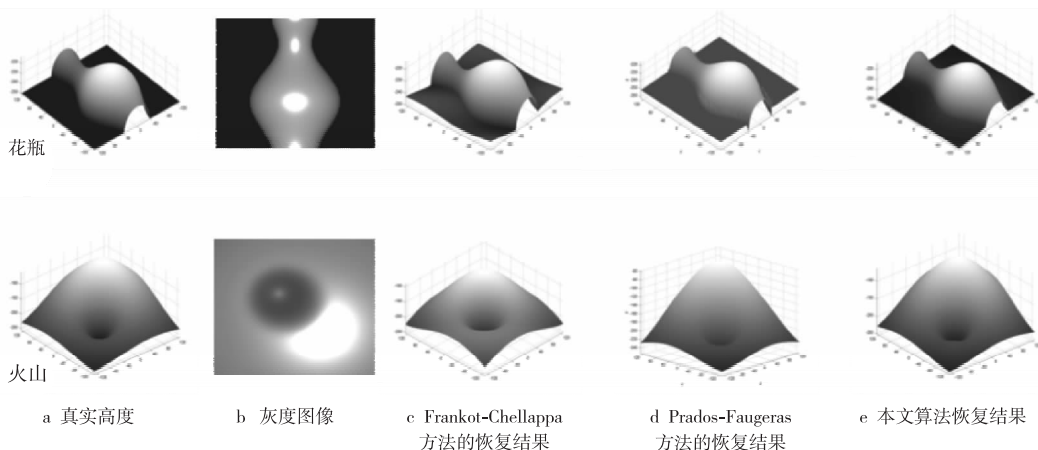


Figure 3 Reconstructed results of the synthetic image

图 3 合成图像恢复结果

Table 1 Error comparison of the synthetic image's reconstructed results

表 1 合成图像重建结果的误差比较

	最大误差			平均误差		
	Frankot-Chellappa	Prados-Faugeras	本文算法	Frankot-Chellappa	Prados-Faugeras	本文算法
花瓶	7.756 0	12.814 5	5.314 0	3.443 4	1.882 7	1.304 1
火山	13.909 9	18.433 5	7.029 1	5.612 4	10.056 1	1.696 8

**Table 2 Speed comparison of the synthetic image's reconstructed results**

**表 2 合成图像重建结果的速度比较**

	CPU 运行时间/s		
	Frankot-Chellappa	Prados-Faugeras	本文算法
花瓶	0.07	1.85	5.53
火山	0.04	1.52	5.01

图 4 是 Prados 和 Faugeras 等人提供的一幅实际拍摄的图像进行三维形状恢复的结果。图像光源采用相机自带的闪光灯,图像分辨率为  $279 \times 368$ ,焦距是 6 mm。图 4a 是原始图像,图 4b~图 4d 是重建结果,因为没有真实高度,无法计算误差。但是,从恢复的结果可以看出,文献[14]算法恢复结果整体误差较大,且严重变形,这是因为其采用漫反射模型来描述物体表面,而实际物体既含有漫反射又含有镜面反射;文献[9]算法恢复结果边缘误差较大,因为其存在着在透视投影下有效部分的问题;而本文的算法更加清晰、准确。

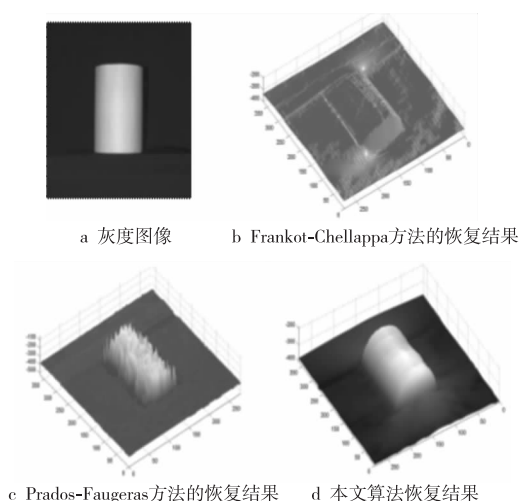


Figure 4 Reconstructed results of the real image

图 4 实际图像恢复结果

## 6 结束语

本文针对传统方法使用朗伯体模型恢复形状存在较大误差的问题,提出了一种基于 Phong 混合模型的明暗恢复形状的新算法。采用更符合实际摄像的透视投影模型代替正交投影模型,减少因模型而产生的重构误差,构建透视投影下的图像辐照度方程,并转换成静态 Hamilton-Jacobi 方程。引入高阶 LLF 通量分裂格式和五阶 WENO 格式来逼近方程的粘性解,提高待求量偏导数的精度,最终重建出物体表面的三维形状。实验结果表明,

本文算法与前人算法相比,精度有一定提高,适用范围更广,但本文算法耗时较长,如何快速重建将是下一步研究的重点。

## 参考文献:

- [1] Roxo D, Goncalves N, Barreto J P. Perspective shape from shading for wide-FOV near-lighting endoscopes[J]. *Neuro-computing*, 2015, 150: 136-146.
- [2] He Bing-wei, Chen Zhi-gang, Lin Dong-yi, et al. Research on reconstruction method for unknown objects through incorporating SFS algorithm and active vision technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(4): 727-736. (in Chinese)
- [3] Tian Lei, Song Ai-guo, Wang Wei. Research on the image haptic display method based on PDE[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(10): 2316-2321. (in Chinese)
- [4] Horn B K P. Shape from Shading: A method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view[M]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1970.
- [5] Zhang R, Tsai P S, Cryer J E, et al. Shape from shading: A survey[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1999, 21(8): 690-706.
- [6] Tozza S, Falcone M. A semi-Lagrangian approximation of the Oren-Nayar PDE for the orthographic shape-from-shading problem[C]// *Proc of International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, 2014: 711-716.
- [7] Prados E, Faugeras O. Unifying approaches and removing unrealistic assumptions in shape from shading: Mathematics can help[C]// *Proc of European Conference on Computer Vision (ECCV'04)*, 2004: 141-154.
- [8] Prados E, Faugeras O, Camilli F. Shape from shading: A well-posed problem?: RR 5297[R]. Grenoble: INRIA, 2004.
- [9] Prados E, Faugeras O. Shape from Shading: A well-posed problem? [C]// *Proc of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition*, 2005: 870-877.
- [10] Zhang Y T, Zhao H K, Qian J. High order fast sweeping methods for static Hamilton-Jacobi equations[J]. *Journal of Scientific Computing*, 2006, 29(1): 25-56.
- [11] Serna S, Qian J. Fifth-order weighted power-ENO schemes for Hamilton-Jacobi equations[J]. *Journal of Scientific Computing*, 2006, 29(1): 57-81.
- [12] Phong B T. Illumination for computer generated pictures [J]. *Communications of the ACM*, 1975, 18(6): 311-317.
- [13] Oren M, Nayar S K. Generalization of the Lambertian model and implications for machine vision[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1996, 14(3): 227-251.
- [14] Frankot R T, Chellappa R. A method for enforcing integrability in shape from shading algorithm[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1988, 10(4): 439-451.
- [15] Zhang L, Yip A M, Brown M S, et al. A unified framework for document restoration using inpainting and shape-from-

shading[J]. Pattern Recognition, 2009, 42(11): 2961-2978.

- [16] Yuen S Y, Tsui Y Y, Chow C K. A fast marching formulation of perspective shape from shading under frontal illumination[J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(7): 806-824.

#### 附中文参考文献:

- [2] 何炳蔚, 陈志鹏, 林东艺, 等. 融合 SFS 和主动视觉技术的未知物体重建方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(4): 727-736.
- [3] 田磊, 宋爱国, 王蔚. 基于 PDE 方法的图像力触觉再现方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10): 2316-2321.

#### 作者简介:



赵中滨(1990-), 男, 河南焦作人, 硕士生, 研究方向为计算机图形学与虚拟现实。E-mail: 172033920@qq.com

ZHAO Zhong-bin, born in 1990, MS candidate, his research interests include com-

puter graphics, and virtual reality.



张志毅(1974-), 男, 山西运城人, 博士, 副教授, CCF 会员(E200033209M), 研究方向为计算机辅助设计与图形学。E-mail: 815802490@qq.com

ZHANG Zhi-yi, born in 1974, PhD, associate professor, CCF member (E200033209M), his research interests include computer aided, design and computer graphics.



邢彩燕(1992-), 女, 宁夏银川人, 硕士生, 研究方向为计算机图形学与虚拟现实。E-mail: 365257995@qq.com

XING Cai-yan, born in 1992, MS candidate, her research interests include computer graphics, and virtual reality.

## 《计算机工程与科学》征文通知

《计算机工程与科学》是由国防科技大学计算机学院主办的中国计算机学会会刊, 是国内外公开发行的计算机类综合性学术刊物, 现为月刊。本刊欢迎关于计算机科学理论、计算机组织与系统结构、计算机软件、计算机应用、计算机器件设备与工艺等学科领域方面的来稿。本刊常年设有高性能计算专栏。

来稿论文必须未发表、未投到其他会议或期刊。

来稿要求和注意事项:

(1) 主题明确、文字精练、语句通顺、数据可靠。

(2) 标题、作者单位、摘要、关键词采用中英文间隔行文; 请注明是否基金资助项目论文(注明项目名称和编号), 并注明文章中图法分类号。务必附上所有作者中英文简历(姓名、性别、出生年月、籍贯、学位、职称、研究方向)、1寸证件照片(军人请用便服照)、中英文通信地址、联系电话和 Email。

(3) 作者在投稿时须注明是否是 CCF 会员(高级会员、普通会员、学生会会员), 若是会员, 请注明会员号。第一作者是 CCF 会员的, 将享受 8.5 折的版面费优惠。

(4) 来稿请用 WORD 软件编辑, 格式为 A4, 40 行×40 列, 通栏排版, 正文为 5 号宋体, 论文长度不得低于 5 个标准版面, 并请自留底稿。

(5) 来稿中图形绘制要求工整、清晰、紧凑, 尺寸要适当, 图中文字用 6 号宋体, 线为 0.5 磅。

(6) 每篇论文格式要求: 1 引言; ……; 最后是结束语。引言和结束语中尽量不用图和表。附录应放参考文献之后。参考文献限已公开发表的。

(7) 来稿文责自负, 要遵守职业道德, 如摘引他人作品, 务请在参考文献中予以著录。署名的作者应为参与创作, 对内容负责的人。文章发表后, 如不同意其他报、刊、数据库等转载、摘编其作品, 请在来稿时声明。

联系地址: 410073 湖南省长沙市国防科技大学《计算机工程与科学》编辑部

联系电话: 0731-84576405

电子邮件: jsjgcykx@vip.163.com

投稿主页: <http://joces.nudt.edu.cn>