

# 利用光源投影坐标系处理 SFS 中的自阴影问题

须明 赵荣椿

(西北工业大学计算机学院, 西安 710072)

**摘要** 对于由明暗恢复形状(SFS)问题来说,自阴影的存在是影响其重构效果的因素之一,应该加以特殊的处理。为了使自阴影的处理不延伸破坏其他区域,并能保护整体的重构形状,提出了一套从阴影分割、坐标系变换到数据拟合的自阴影处理方法。该方法使用了根据图像平面以及光源方向定义的光源投影坐标系,以降低自阴影处理问题的复杂性,从而使得可以通过逐行恢复图像内跨各自阴影数据区段高度变化量的方式来实现其基本处理要求,并可采用抛物线拟合的方法来完成重构的阴影区形状与其他部分的光滑连接。实验表明,该方法能有效地改善SFS的重构形状。

**关键词** 由明暗恢复形状 朗伯体模型 自阴影 表面法向量 光源投影坐标系

**中图法分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2005)01-0064-05

## Solving Self-shadow Problem of Shape from Shading in Light Source Projected System

XU Ming, ZHAO Rong-chun

(School of Computer Science, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072)

**Abstract** To the problem of shape from shading, the existence of self-shadowed regions in the image is one of the factors which could cause the deformation to the final 3D reconstructed surface and it should be coped with in its special way. In the paper, a set of method is presented, which is composed of shadow region segmentation, coordinate system transmission, and the parabolic data interpolation. The method is based on the principle that the distortion of self-shadow should be enclosed within its region, in order not to destroy the global reconstructed shape. The light source projected system is introduced, which is defined on the image plane and the direction of light source. This can greatly simplify the problem, and makes it possible to analyze the self-shadowed data sections in the image vow by vow. And the primary goal could be achieved by recovering the depth gaps across the self-shadowed data sections. Meanwhile, the height incremental values at each shadowed pixel could be estimated by parabolic interpolation, and makes the recovered shadowed shapes connect with other regions smoothly. It has demonstrated that, this proposed method could improve the reconstructed 3D shapes from shading efficiently.

**Keywords** shape from shading(SFS), lambertian reflection model, self-shadow, surface normal, light-source projected coordinate system

## 1 引言

由明暗恢复形状(shape from shading, SFS)是一种被计算机视觉界广为关注的3维形状重构的思

想。该思想的主要内容是,在光线方向、物体表面的反射模型已知的条件下,利用单幅图像当中灰度的明暗变化所隐含的形状信息来重构物体的表面3维形状。目前这方面的研究主要是针对一定条件下的图像进行的,这些条件主要是:①单一的已知方向的

**基金项目:**国家自然科学基金项目(60141002);英国皇家学会基金项目(Q775)

**收稿日期:**2004-03-22;**改回日期:**2004-08-23

**第一作者简介:**须明(1967~),男,1990年获西北工业大学计算机应用专业学士学位,1992年获西北工业大学计算机应用技术专业硕士学位,2000年于西北工业大学攻读博士学位,现于中国航空无线电电子研究所与上海交通大学的联合博士后工作站工作。研究方向为图像处理、模式识别与计算机视觉。E-mail:hookexu@pub.xaonline.com

平行光源;②物体表面高度具备连续的二阶导数,且其表面为同一反射率的朗伯体表面。自 1970 年 Horn 提出 SFS 的概念以来,相继出现了许多解决该问题的方法<sup>[1-4]</sup>。1999 年 Zhang 等人在文献[5]中,将这些方法分成最小化方法、传播方法、局部方法和线性化方法等 4 个大类,并对其中的 6 种著名的算法在表现效果上进行了详细的比较。从文献[5]中各算法的比较看,这些算法虽然采用的方法各异,但都共同存在一些问题,其中,自阴影问题就是其中的影响因素之一。

自阴影是一般物体的图像中不可避免的一种低灰度区域,对这种区域的数据如果处理不当,可能会影响处理结果的正确性和处理方法的可靠性。自阴影问题的特殊之处就在于,阴影区域内的灰度值全部为零,根本不存在灰度的明暗变化,即该区域内的形状信息在灰度的明暗变化上没有任何体现。长期以来,SFS 算法在这个问题上,往往采用回避的策略,由于其脱离了一般实际情况,因而使得现有的方法存在很大的局限性,即在自阴影问题上无能为力。这些方法几乎没有考虑自阴影问题的特殊性,只是将自阴影等同于一般的具有灰度变化的区域进行统一的处理,致使在恢复的三维立体表面的结果当中存在产生大的形状畸变的可能性。

虽然自阴影产生的原因较为简单,即它是与物体的表面朝向和光源方向有着较为密切的关系,但由于光源方向的任意性,因而使得其在处理计算上较复杂,而这种复杂性的根源在于处理过程中坐标系的选择不够恰当所致,本文通过采用与光源方向相关的光源投影坐标系,不仅大大地简化了各种关系,同时也降低了对数据的处理难度,本文以此为基础,提出了正确处理自阴影的一般原则,并实现了一套从阴影区域的分割到进行数据拟合的自阴影处理方法,实验结果证明,效果很好。

## 2 自阴影区域的分割

在 SFS 问题的一般假设条件下,物体表面的反射模型可以归一化地描述为

$$I(x, y) = \mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_s = \cos\theta \quad (1)$$

其中, $I(x, y)$ 表示 $x, y$ 图像处像素点的亮度, $\mathbf{n}$ 为其表面的单位法向量, $\mathbf{n}_s$ (下角 S 代表 source,即光源方向,下同)为光源方向的单位矢量, $\theta$ 为 $\mathbf{n}$ 与 $\mathbf{n}_s$ 之间的夹角。此方程称为亮度方程。

当 $\theta \geq \pi/2$ 时,图像上就会有 $I(x, y) = 0$ ,由于此时原亮度方程所表示的关系不再适用,因此需要加以区别对待,由大多数这样的点所聚集成区域就是自阴影区域,该区域中也包含少量的由于遮挡而产生的阴影。

一般原理上,判断自阴影是否存在的依据是:(1) $I(x, y) = 0$ , (2) $\nabla I(x, y) = 0$ ;其中 $\nabla I(x, y)$ 表示任意方向的亮度梯度。对于实际的图像来说,由于存在环境光线的影响,使得二者均不能得到绝对的满足,因此一般采用取较小的门限值的方法来判定自阴影是否存在。这种门限方法是比较可靠的,因为对于低亮度值的非阴影点,其 $\theta$ 值距 $\pi/2$ 较近,故在某些方向上的 $\nabla I(x, y) = -\sin\theta$ 的绝对值就比较大,即在某些方向上,这些点的亮度梯度会超过门限值。

## 3 光源投影坐标系

通常解决 SFS 问题所使用的坐标系为图像坐标系,即自然空间的横坐标 $X$ 和纵坐标 $Y$ 分别与图像平面的横向方向和纵向方向相一致,并用 $Z$ 坐标表示相对离开图像平面向上的方向(即相对高度),同时采用横向(纵向)相邻像素点间的距离作为坐标的长度单位,称为像素距离。在此坐标系中,光源方向的单位矢量表示为 $\hat{\mathbf{n}}_s = (\hat{n}_x^s, \hat{n}_y^s, \hat{n}_z^s)$ ,其中, $\hat{n}_x^s, \hat{n}_y^s, \hat{n}_z^s$ 分别为单位光源方向矢量在 3 个坐标轴方向上的分量,同时也是该方向分别与 3 个坐标轴之间夹角的余弦,并且有 $0 < \hat{n}_z^s \leq 1, -1 \leq \hat{n}_x^s, \hat{n}_y^s \leq 1$ 。

上述自然坐标系的定义与光源方向无关,而 SFS 当中的许多问题均与光源方向有关,由于光源方向的任意性,使得许多问题(包括自阴影)在形式上变得错综复杂,因此处理上比较棘手。为了使这些问题能够以统一的方式进行处理,本文提出使用如图 1 所示的坐标系,即与光源方向相关的光源投影坐标系。

在原图像坐标系中,令 $\hat{\tau}_s$ 为光源方向与其 $Z$ 轴之间的夹角,即光源方向的倾斜角;令 $\hat{\sigma}_s$ 为光源方向在图像平面上的投影与 $X$ 轴之间的夹角,即光源方向的偏斜角,且有

$$\hat{\sigma}_s = \tan^{-1} \left( \frac{\hat{n}_y^s}{\hat{n}_x^s} \right) \quad (2)$$

光源投影坐标系就是将原图像坐标系做水平旋转,使其 $X$ 轴与 $\hat{\sigma}_s$ 的方向重合,以构成的新的坐标系。

该坐标系与原图像坐标系的差别在于,它所规

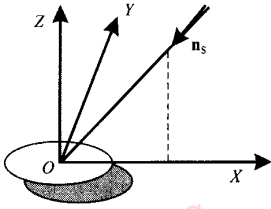


图1 光源投影坐标系  
(其中,  $\mathbf{n}_s$  为光源方向单位矢量)

Fig. 1 The light source projected system

定的  $X$  方向为光源方向在图像平面的投影所指示的方向,使得该坐标系的定义同时与图像平面以及光源方向相关联。原自然空间坐标系与图1所示图像坐标系坐标轴之间的关系矩阵为

$$[X, Y, Z]^T = \begin{bmatrix} \cos\hat{\sigma}_s & -\sin\hat{\sigma}_s & 0 \\ \sin\hat{\sigma}_s & \cos\hat{\sigma}_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}]^T \quad (3)$$

其中,  $[X, Y, Z]$  代表与光源方向相关的新坐标系,  $[\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}]$  代表原图像坐标系。

在光源投影坐标系中,光源方向的偏斜角  $\sigma_s = 0$ , 其倾斜角  $\tau_s$  与原图像坐标系中的倾斜角  $\hat{\tau}_s$  相同, 即  $\tau_s = \hat{\tau}_s$ 。此时光源方向的单位矢量可以只用一个倾斜角  $\tau_s$  来表示:

$$\mathbf{n}_s = (\sin\tau_s, 0, \cos\tau_s) \quad (4)$$

如果采用空间梯度  $(p_s, q_s, 1)$  的形式来表示新坐标系中的光源方向矢量, 则有  $p_s = \sin\tau_s / \cos\tau_s$ ,  $q_s = 0 / \cos\tau_s = 0$ 。于是得到在该坐标系下的光源方向的标准形式为  $(p_s, 0, 1)$ , 这说明, 对于 SFS 问题来说, 适用于上述形式光源方向的 SFS 方法具有普遍的意义。SFS 问题的研究也由此得到极大的简化, 这种简化涉及到解决 SFS 问题的各个方面, 在以下的讨论中将可以深刻地体会采用该坐标系带来的便利。

## 4 自阴影分析

### 4.1 处理自阴影区域的一般原则

由于在图像的阴影区域中, 物体表面由于没有得到光线的直接照射, 致使其在该区域上的具体形状在图像中无法得到相应的表达, 而且其可以利用的信息要比其他有亮度变化的区域要少得多, 因此, 很难期望完全正确地重构阴影区域的形状。在对待自阴影问题上, 实际的做法应该以使自阴影的存在不致破坏整个物体的整体形状为原则, 即使得自阴

影对重构结果的影响仅限制在自阴影区域的范围之内, 而不扩散到其他区域。要做到这一点, 应该尽量保证跨阴影区域的高度的变化量能够得到正确的恢复, 并在此基础上, 尽量实现阴影区域的形状与其相连区域形状的平滑对接。

在通常 SFS 所处理的图像中, 均要求其所提供的信息能完整, 充分地反映物体形状的各个细节, 且这种图像中的阴影是不破坏信息完整性的自阴影, 由于它所占比例较小, 加之物体表面的光滑性, 因此其沿光源方向的形状变化也自然相对简单, 并可以用相对简单的形状方式来模拟。这样就使得处理阴影区域的最重要的原则能够得到有效的保障。

在光源投影坐标系中, 由于光源的投影方向与  $X$  轴重合, 致使某行图像数据上的阴影仅与该行的高度数据的形状有关, 因此使得对阴影的分析和处理可以在  $X-Z$  的二维平面上逐行进行 (如图2所示)。

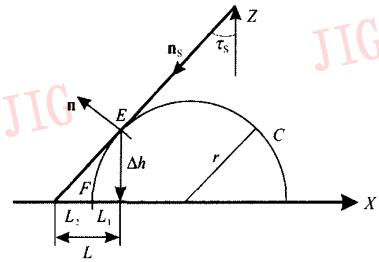


图2  $X-Z$  平面自阴影分析

$L$  为阴影长度,  $\Delta h$  为跨阴影区的高度变化量,  $L_1$  为弧线  $\widehat{EF}$  部分的阴影长度,  $L_2$  为遮挡部分的阴影长度,  $C$  为弧线  $\widehat{EF}$  的密切圆。

Fig. 2 Analysis the self-shadow in  $X-Z$  plane

从图2中可以看出, 自阴影实际上也是一种遮挡阴影, 只是在被遮挡的区域当中包含物体自身局部光滑结构的一部分, 该部分在  $X-Z$  平面上可由某个圆弧  $\widehat{EF}$  来近似表示, 其在阴影线上的长度为  $L_1$ ,  $L_2$  为在其他局部结构上的遮挡阴影长度, 跨阴影区的高度的变化量  $\Delta h$  基本上取决于光源方向以及当前阴影的总长度  $L$ , 有

$$\Delta h = L \cdot \cos\tau_s \quad (5)$$

另外, 由于在物体的边界处的自阴影区域中, 不包含  $L_2$  部分, 即该遮挡部分被其他亮度的背景所取代, 因此, 在边界处跨自阴影区高度的变化量与阴影长度的关系为

$$\Delta h = L_1 \cdot \frac{\sin\tau_s}{1 - \cos\tau_s} \quad (6)$$

此时,  $L = L_1$ 。

以上的关系虽然是在假设阴影曲面在  $X-Z$  平面的截面曲线为凸形时获得的,但它们也同样适用于凹形的情况。在自阴影的处理当中利用这些关系就能够达到以恢复跨阴影区高度变化量的方式满足其基本处理原则的要求。

### 4.2 插值计算

插值计算的目的在于尽量使恢复的阴影区域的形状与相邻区域实现光滑连接,而对于物体内部的阴影区域,则首先需要确定  $L_1$  和  $L_2$  的各自长度,并使它们按照一定的比例进行分配,根据图 2 所示的关系,长度比例的选取应当满足

$$0 \leq \frac{L_2}{L_1} \leq \frac{1}{\cos\tau_s} \quad (7)$$

对于  $L_2$  区域,一般可将其作为左边连接区域的水平过渡,而不进行进一步的处理;对于  $L_1$  区域,通常将其作为凸曲线来拟合,因为仅凭图像上的信息,仍无法正确判断阴影区在  $X$  方向上的凸凹,但在一般情况下,自阴影在  $X$  方向为凸的曲面上产生的情况较多。

因此,插值计算的过程就是确定  $L_1$  区域内各阴影点在  $X$  方向上的高度增量的过程,该高度增量可由其在  $X$  方向梯度来描述:  $p(x, y) = \hat{z}(x, y) |_{x} = -n_x/n_z$ , 它表示在该像素点所代表的小曲面片在  $X$  方向上高度的增量。另外,由图 2 可知,产生自阴影的右边界点  $E$ , 其表面高度在  $X$  方向的梯度  $p_e$  (下角  $e$  代表 edge) 限定为

$$p_e = \tan(\pi/2 - \tau_s) = \cot(\tau_s) \quad (8)$$

由于在光源投影坐标系中,光源始终是从右上方照射物体,因此可以统一地认为:每个阴影区段内的表面高度是从左到右单调递增的,但在  $X$  方向上这些高度的增量(即梯度  $p$ ) 是单调递减的,并且以其右端阴影边界点的  $p$  值(即  $p_e$ ) 最小。具备上述特征的高度曲线的种类有很多,抛物线就是其中较

为简单,且比较实用的一种。

设拟合该阴影区段的高度数据的抛物线方程为

$$z(x) = z_0 + ax - bx^2 \quad (9)$$

对上式微分,得  $p(x) = a - 2bx$

此时,该阴影点列的  $p$  值为一个等差数列。假设该数列的长度为  $L_1$ ,  $p$  值序列的公差为  $\Delta p$ , 则构造出该  $p$  值序列为  $p_e + (L_1 - 1)\Delta p, p_e + (L_1 - 2)\Delta p, \dots, p_e + 2\Delta p, p_e + \Delta p, p_e$ 。其中,公差项  $\Delta p$  的大小可以由下式来确定,

$$\Delta p = 2 \cdot \frac{\Delta h - L_1 p_e}{L_1(L_1 - 1)} \quad (10)$$

由此即可粗略地构造出所有阴影点的  $p$  值,这些值可以用在 SFS 的重构过程当中。

## 5 实验结果

本文采用文献[1]所提供的人工图像进行实验,以便于与文献[1]中涉及的一些 SFS 方法的处理结果相比照,这些图像可以在佛罗里达大学网站<sup>[6]</sup>获得,它们的尺寸均为  $256 \times 256$  pixels。文献[5]中提供了 6 种 SFS 算法的实验结果,从其中效果较好的算法所重构的形状可以发现,它们对于没有阴影的正面光线照射图像以及由于斜线照射而具有阴影的图像,其重构的质量有很大的区别,即前者的效果普遍好于后者。这除了与它们各自在原理上依然存在缺陷有关外,没有考虑阴影的影响也是其中的因素之一。本文采用的 SFS 方法是作者提出的一种局部方法,虽然该方法的效果还不令人满意,但由于采用了对阴影区域进行特殊处理的方式,所以重构结果没有出现大的扭曲形变。

图 3 显示了对光源法向量为  $(1, 0, 1)$  光线下的花瓶图像(图 3(a))的处理情况,该图像存在边界自阴影的区域(图 3(b)),展示了最终的重构形状

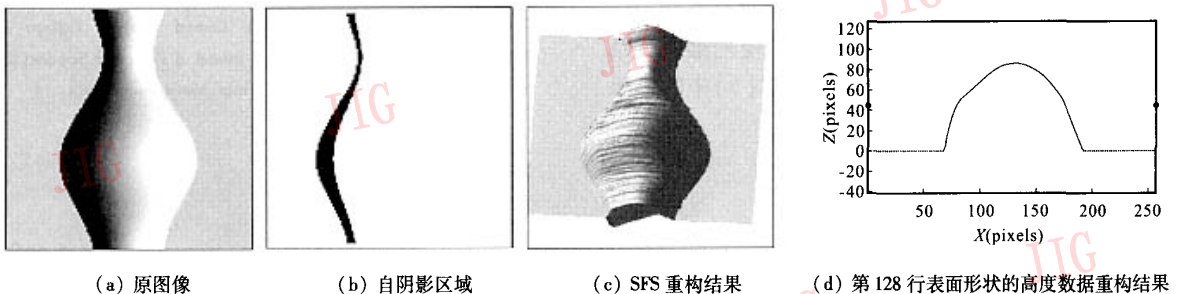


图 3 花瓶图像的处理结果

Fig. 3 The reconstructed results of the vase image

(图 3(c)), 以及对图像第 128 行表面形状的高度数据进行重构的结果(图 3(d))。

图 4 显示了对(1,0,1)光线下的莫扎特头像(图 4(a))的处理情况,该图像存在边界自阴影区

域以及物体内部的阴影区域(图 4(b)),  $L_2$  与  $L_1$  之间的分配比例选取为 0.7:1。其表面形状的重构结果在见图 4(c)。

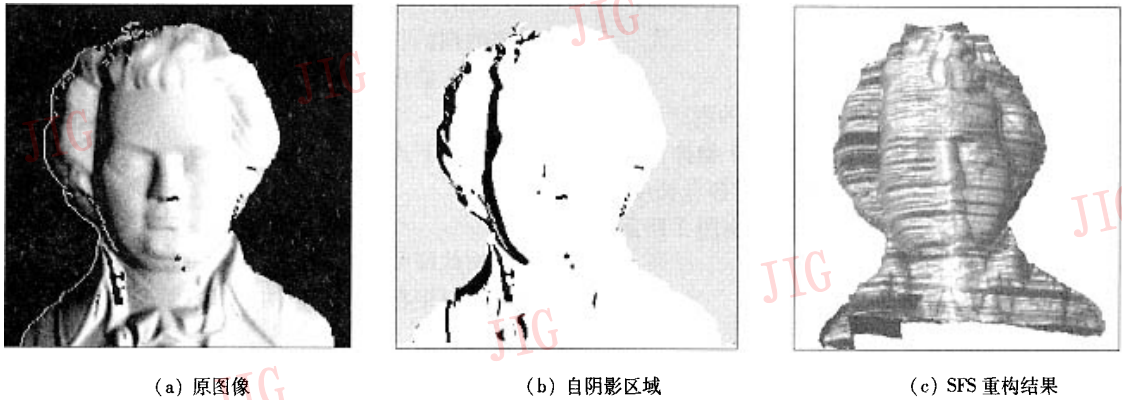


图 4 莫扎特头像的处理结果

Fig. 4 The reconstructed results of the Mozart image

从以上的重构实验结果可以看出,本文所提出的自阴影的处理方法可以较好地处理 SFS 问题中的自阴影区域,并在一定程度上避免了由于阴影的存在而导致重大形状重构畸变的产生,从而最终保证了整体重构效果。

## 6 结 论

在 SFS 方法中,增加自阴影处理功能的这种做法是对 SFS 问题在内容上的补充和完善。本文围绕这方面的内容,提出了与处理自阴影有关的阴影分割、坐标系的选取、处理的目的是和原则,以及相应进一步的拟合计算方法。

实验结果说明,通过采用与图像平面以及光源方向相关的光源投影坐标系,可使 SFS 中的一些问题得到形式上的统一,从而为简化处理自阴影问题创造了条件;同时证明,本文提出的保证恢复阴影区高度变化量的处理原则是可行的,并使三维恢复结果的变形有效地减少了。通过与文献[5]中的结果

进行对比不难看出本文使用自阴影处理的优势。

## 参考文献 (Reference)

- 1 Tsai P S, Shah M. A fast linear shape from shading [A]. In: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Urbana Champaign, 1992: 734 ~ 736.
- 2 Bichsel M, Pentland A. A simple algorithm for shape from shading [A]. In: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Urbana Champaign, 1992: 459 ~ 465.
- 3 Dupuis P, Oliensis J. Direct method for reconstructing shape from shading [A]. In: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Urbana Champaign, 1992: 453 ~ 458.
- 4 Lee C H, Rosenfeld A. Improved methods of estimating shape from shading using the light source coordinate system [J]. Artificial Intelligence, 1985, 26(2): 125 ~ 143.
- 5 Zhang R, 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): 690 ~ 706.
- 6 The Website of the University of Central Florida, College of Engineering and Computer Science, School of Computer Science (美国佛罗里达大学网站) [EB/OL]. <http://www.cs.ucf.edu>