

A Survey of Research Work on Shape from Shading

Xiaofang Shao¹, Mingjuan Cai²

¹Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao

²Aeronautical Institute of the Naval Equipment Academia, Shanghai

Email: xiaoxiao_0731@163.com

Received: Jan. 19th, 2013; revised: Jan. 31st, 2013; accepted: Feb. 6th, 2013

Abstract: The reconstruction for 3D surface shape of object is one of the main goals in the field of computer vision. It needs to complete a mapping from 2D image to 3D world. Shape from shading (SFS for short) is one of the main methods for this goal. This paper gives a comprehensive summary on related research work based on the description of the SFS problem, then their characteristics and shortcomings are analyzed; at last, further research directions are suggested.

Keywords: Shape from Shading; 3D Surface Reconstruction; Depth Map

阴影恢复形状技术研究进展

邵晓芳¹, 蔡明娟²

¹海军航空工程学院青岛校区, 青岛

²海军装备研究院标准所, 上海

Email: xiaoxiao_0731@163.com

收稿日期: 2013年1月19日; 修回日期: 2013年1月31日; 录用日期: 2013年2月6日

摘要: 根据单幅灰度图像恢复相应物体的三维表面形状是计算机视觉中的一个基本问题, 也是一个重要研究领域, 相当于完成一个从二维空间到三维空间的映射, 解决这类问题的一个重要方法是从阴影恢复形状(Shape from Shading, 简称 SFS)。从问题描述入手, 对阴影恢复形状技术涉及基本问题和现有计算方法进行了分类总结并分析了现有方法的特点和不足, 最后指出了进一步研究的发展方向。

关键词: 阴影恢复形状; 三维表面重构; 深度图

1. 引言

由阴影恢复形状(Shape from Shading)的目标是从一幅或多幅图像中推导场景的三维描述, 在机器视觉中, 恢复三维形状的技术被称为由 X 恢复形状(Shape from X)技术, 其中 X 可以是阴影、立体、运动和纹理等^[1]。这项技术在文字图像的变形校正(Document Restoration)、焊点图像的三维恢复、地貌恢复、人脸图像的三维重建(Face Reconstruction)等^[2]领域有初步的应用, 在医学图像处理领域有很大的应用潜力。但是, 因为由阴影恢复形状的本质是要从二维信息推导三维信息, 需要逆向推导并存在多解, 这一研究领域

一直进展缓慢。

本文从问题的描述入手, 对由阴影恢复形状技术涉及的光照模型、约束条件等基本问题和国内外研究现状进行了较为全面的描述, 并对现有技术进行了总结分析, 展望了进一步的研究方向。文章的结构安排如下: 第二节是对问题的描述, 具体介绍了光照的反射模型、约束条件和三维信息表述方式; 第三节对现有计算方法进行了分类总结; 最后是分析和展望。

2. 问题描述

由阴影恢复形状利用成像表面亮度的变化解析

物体表面的矢量信息，从而转换为表面的深度信息。一般的解决思路是：

1) 设定光源的距离和照射方式(是正交型还是透视型)，并建立一个对光照反射的数学模型；

2) 设定约束条件以求解图像三维形状信息，原因是从数学角度而言，问题是欠定的，另外，图像阴影形成的机制非常复杂，只有设定一系列的约束条件，才有可能通过解一组简化的方程组得出一些推导结果，这也是利用阴影这一图像能够提供的常见线索之一进行特征推导的难点所在；

3) 推导图像的亮度/灰度信息与图像三维形状之间的关系，由阴影恢复形状的算法有三种评价标准，即深度值误差的均值和方差、表面梯度误差的均值、运行时间。

2.1. 光照的反射模型

首先，在光照的反射模型方面，主要有以下三种模型。

1) Lambertian 模型：假定光源为无限远处点光源或均匀照射的平行光，如图 1 所示，成像的几何关系是垂直投影，目标表面为理想散射表面，只有漫反射，而照射到表面的光能由从光源位置看到的表面面积决定，可由公式(1)描述：

$$I_L = A\rho \cos \theta_i \tag{1}$$

式中， A 为光照强度； ρ 为目标表面的反射率； θ_i 为入射角， $\cos \theta_i$ 为缩减的面积系数。

2) Specular 模型：镜面反射只有当入射角等于反射角时才会发生，如下式所示：

$$I_s = B\delta(\theta_s - 2\theta_r) \tag{2}$$

式中， I_s 为镜面反射亮度； B 是光强； θ_s 为光源方向与视线方向的夹角； θ_r 为视线方向与表面法向之间的

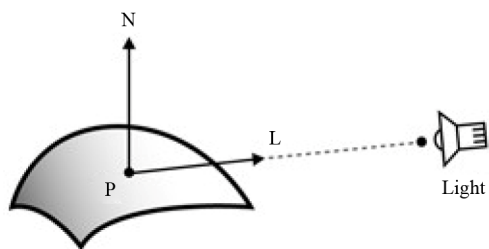


Figure 1. The Lambertian diffuse reflectance model
图 1. Lambertian 漫反射模型

夹角。Torrance 和 Sparrow^[2]对这一模型进行了改进，使之与实际情况更为接近，但是计算比较复杂，Healey 和 Binford 在他们的基础进行了简化，提出了一个高斯分布的光照模型：

$$I_s = Ke^{-(\alpha/m)^2} \tag{3}$$

式中， K 为表征强度的常数；令 H 表示视线与光源方向夹角的平分线， α 是表面法向与 H 的夹角； m 表征表面的粗糙程度。

3) Hybrid 模型：现实世界中的大多数表面都不是纯漫反射或纯镜面反射，而是两者的结合，于是有人提出了混合模型：

$$I = (1-\omega)I_L + \omega I_s \tag{4}$$

式中， ω 为加权值。

除了上述模型之外，还有一些更复杂的模型组合，这些模型组合虽然较漫反射模型和镜面反射模型更接近于实际情况，但还是因为计算的复杂性没有被广泛采用。目前使用最广泛的模型是 Lambertian 模型，即漫反射模型。为提高算法的实用性，需要设计更复杂的反射模型和光照模型，在与实际情况相符的同时兼顾计算的可行性和复杂程度。在这一方面，Oliver Vogel 等^[3]通过对图像进行分割和预处理改善了对一些结构简单的自然图像的处理效果；Qihui Zhu 等^[4]提出引入对物体表面的全局约束来解决一些计算过程中存在的模糊性。

2.2. 约束条件

在由阴影恢复形状的第二步中，添加的约束条件主要有^[2,5]：

- 亮度约束，亮度计算误差的平方积分最小；
- 平滑性约束，表面的平滑性一般用梯度在 x 、 y 方向的偏导数平方和的积分最小来约束；
- 可积分性约束：一般用 x 方向的梯度在 y 方向的偏导数与 y 方向的梯度在 x 方向的偏导数的差的平方和积分来描述；
- 灰度梯度约束：将恢复的表面在 x 、 y 方向的灰度梯度与输入图像的对应值分别求平方差，然后取在 x 、 y 方向上的和的积分，要求积分值最小；
- 归一化法向约束：要求恢复的表面法向的归一化范数与单位矢量之差的积分和最小；

- Dirichlet 边界条件: 也被称为常微分方程或偏微分方程的“第一类边界条件”, 指定微分方程的解在边界处的值;
- Neumann 边界条件: 也被称为常微分方程或偏微分方程的“第三类边界条件”。纽曼边界条件指定了微分方程的解在边界处的微分。

2.3. 三维信息表述方式

在推导图像的亮度/灰度信息与图像三维形状信息之间的关系时, 其三维形状信息可以用以下几种方式描述^[1]:

- 1) 深度图, 从摄像机到目标表面点的相对距离或目标表面点相对于 x - y 平面的高度;
- 2) 表面法向 (n_x, n_y, n_z) , 即垂直于目标表面的切平面的矢量方向;
- 3) 表面梯度 $(p, q) = \left(\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y} \right)$ 及倾角 ϕ 、 θ , 即

深度值在 x 、 y 方向上的变化率, 倾角 ϕ 、 θ 与表面方向的关系为

$(n_x, n_y, n_z) = (l \sin \phi \cos \theta, l \sin \phi \sin \theta, l \cos \phi)$, 式中 l 为表面法向的幅度值。这里, 如果采用法向表示, 需求解三元一次线性方程; 如果用梯度表示, 则为二元非线性方程; 如果将表面取向、梯度与图像亮度之间的关系建立起方程, 就是研究者们通常所说的反射图 (Reflectance Map)。

上述方法中, 深度图是最基本的表述方式, 其他两种方式实际上是在深度图的基础上进一步推导一些信息, 如表面的法向或梯度。

3. 计算方法及评价指标

由阴影恢复形状的方法是 Horn 和 Brooks^[1]于 19 世纪 70 年代最先提出的, 随后的二十年研究者们一直致力于计算方法的研究, 由于计算结果一直不理想, 19 世纪 90 年代由阴影恢复形状方法的准确性和收敛性引起了研究者的重视。历经几十年的发展, 现有的方法可以分为两类(表 1):

- 第一大类可命名为“全局法”, 这类方法有两种求解思路, 一种是利用像亮度、平滑性这样的全局约束构造代价函数, 然后应用变分法进行迭代优化计算, 当使得代价函数最小化时, 便得到问题的解;

第二种是对反射强度图进行线性化, 然后进行求解。

- 第二大类是采用局部约束, 我们称之为“局部法”, 也有两种求解思路, 一种是从图像中的奇点(亮度极大值点)扩散形状信息; 第二种用球面或柱面等通过拟合恢复形状。

图 2 给出了一个光照方向为 $[0, 0, 1]^T$ 的测试球图像, 其表面的高度及法向都是一致的, 通过对图 2 所示实验图像进行实验, 根据对阴影恢复形状算法的评价标准, 可对典型算法进行量化比较, 比较结果如表 2 所示, 其中用深度图表示计算结果的方法无表面梯度误差均值。

从表 2 中可以看出: 全局法中, Lee 和 Kuo^[6]提出的算法计算精度最高, 其次是 Brooks 和 Horn 等提出的方法; 局部法中, Lee 和 Rosenfeld^[7]、Oliensis^[8]等提出的算法计算精度较高, 而且局部法的计算精度普遍优于全局方法。

4. 结束语

综合分析现有的研究工作, 可以总结出以下特点:

- 1) 现有算法对合成图像的处理效果相差不多, 但目前还不够理想, 而且对自然图像的处理效果更差;
 - 2) 现有方法多针对单一光源和单一图像, 不能处理物体间的交叉反射, 而且需要对表面形状做出一些假设, 处理结果离理想效果距离较远; 当光照方向改变时, 很多算法的计算精度也会有较大改变;
 - 3) 全局法大都采用变分法求解, 多数方法只能处理单一平滑曲面, 只有 Malik 和 Maydan^[9]提出的方法可以处理分段平滑的曲面;
 - 4) 多数方法假定光照方向已知, 只有少数算法能对光照方向进行估计^[10], 即 M. Ben-Ezra 和 S. K. Nayar^[11]提出的方法;
 - 5) 至今还没有人证明由阴影恢复形状的解的唯一性或存在性, 许多文献指出由阴影恢复形状是个病态的问题, 在不添加约束条件的情况下没有唯一解, 而且还存在是凸还是凹两种情况之一的模糊性。
- 现代研究表明, 人眼对形状信息的回复不仅仅依靠阴影, 而且还利用了目标外形的边界线、基本特征点、视觉系统对目标的先验知识等^[12], 因而如能将阴

Table 1. Classification and summary for SFS methods
表 1. 由阴影恢复形状的方法分类汇总

分类	提出者	约束条件	三维表示	主要思路及特点
全局法	Brooks 和 Horn	平滑性约束、亮度约束 Dirichlet & Neumann 边界条件	表面法向	预知被遮挡的边界信息用于初始化, 曲面高度恢复过程从边界开始, 逐渐增加曲面高度, 曲面高度增量由横截距离和局部切平面的倾斜角度确定
	Vega 和 Yang	平滑性约束、可积分约束, Dirichlet & Neumann	同上	加入启发式搜索提高 Brooks 和 Horn 方法的稳定性
	Lee 和 Kuo ^[6]	亮度约束和平滑性约束	表面梯度	采用三角化式的拼接方式对表面近似, 建立各拼接的小三角形的灰度与其顶点深度之间的关系进行求解, 不需初始化
	Malik 和 Maydan ^[9]	亮度约束	表面法向	提取分段平滑曲面的方法, 唯一一种可处理分段平滑曲面的方法
	M. Ben-Ezra 和 S. K. Nayar ^[11]	亮度约束	表面法向	针对场景中的透明物体设计, 通过非线性迭代过程计算出光照方向及表面法向, 实验结果表明这种方法的计算复杂, 收敛性差
	H. Ragheb 和 E. R. Hancock ^[12]	同上	表面 法向	引入贝叶斯方法建立混合模型进行迭代计算, 实验结果表明这种方法对符合 specular 模型的图像比较有效
	Zheng 和 Chellappa ^[13]	灰度梯度约束, Dirichlet & Sonner	同上	采用金字塔数据结构提高运算速度, 且无需对曲面边界进行初始化
	Kimmel, Bruckstein 和 Siddiqi	可积分性约束	深度图	曲面重构作为从阴影恢复形状过程可积部分来实现.利用水平集理论, 求解一个图像辐照度方程
	Pentland ^[16]	亮度约束	表面梯度	在频域建立表面梯度和表面高度的线性关系, 对反射方程通过 Fourier 和反 Fourier 变换进行线性化求解
	Tsai 和 Shah ^[17]	亮度平滑性约束	表面梯度	先对梯度进行离散化近似, 针对表面高度值线性化反射函数, 基于深度信息建立反射方程, 通过雅可比迭代求解, 无需求解逆矩阵, 算法简单高效
局部法	Lee 和 Rosenfeld ^[7]	灰度梯度约束	表面梯度 及倾角	假定表面的每个点周围的小区域都可以用球面近似, 利用图像灰度的一阶导数计算表面在光源所在坐标系中的倾角, 无需设定参数
	Oliensis ^[8]	亮度约束和平滑性约束	深度图	表面形状从奇点(Singular Points)开始用球面拟合的方式重构
	E. Rouy 和 A. Tourin ^[18]	亮度约束和平滑性约束	深度图	基于 Hamilton-Jacobi-Bellman 方程的扩散方法
	Bichsel 和 Pentland ^[19]	亮度约束和平滑性约束	深度图	根据对奇异点初始化结果向其八个邻域方向扩散深度信息, 然后依次递推适于复杂的自然地表重构
	R. Kimmel 和 A. M. Bruckstein ^[20]	亮度约束和平滑性约束	表面梯度 及倾角	封闭曲线扩散法
Ju Yong Changa ^[21]	灰度梯度约束	表面梯度 及倾角	将 Lee 等 ^[7] 提出的局部法与全局能量函数相结合, 采用割图的方法进行优化计算, 解决了原局部法中存在的凹凸模糊性问题。	

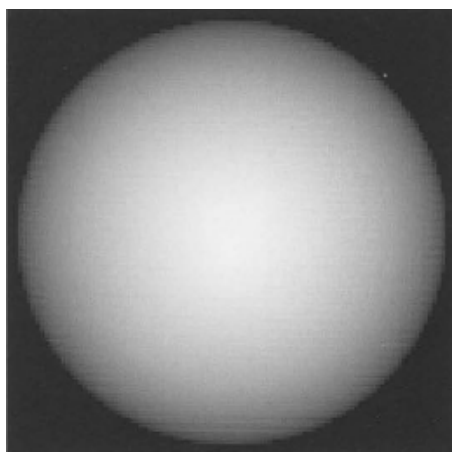


Figure 2. Experimental image
图 2. 实验图像

Table 2. Error comparison of the SFS methods on Figure 2
表 2. 由阴影恢复形状的方法对图 2 的误差比较

分类	提出者	深度误差的均值	深度误差的方差	表面梯度误差均值
全局法	Brooks 和 Horn	2.96	1.57	(1.22,1.38)
	Vega 和 Yang	2.98	1.65	(1.25,1.36)
	Lee 和 Kuo ^[6]	2.22	1.37	(1.02,0.98)
	Malik 和 Maydan ^[9]	4.76	2.65	(2.17,2.26)
	M. Ben-Ezra 和 S. K. Nayar ^[11]	5.63	3.21	(3.36,2.73)
	H. Ragheb 和 E. R. Hancock ^[12]	6.74	3.45	(2.24,2.33)
	Zheng 和 Chellappa ^[13]	3.13	2.05	(1.35,1.42)
	Kimmel, Bruckstein 和 Siddiqi	3.31	2.84	-
	Pentland ^[16]	3.18	2.05	(1.35,1.49)
	Tsai 和 Shah ^[17]	2.57	1.45	(1.27,1.31)
局部法	Lee 和 Rosenfeld ^[7]	1.21	0.85	(0.95,0.86)
	Oliensis ^[8]	1.32	0.87	-
	E. Rouy 和 A. Tourin ^[18]	2.79	1.82	-
	Bichsel 和 Pentland ^[19]	3.27	1.96	-
	R. Kimmel 和 A. M. Bruckstein ^[20]	3.23	2.66	(1.85,1.76)
	Ju Yong Chang ^[21]	1.75	1.32	(1.46,1.39)

影信息与其他图像信息进行融合处理,将极大提高算法的鲁棒性;在这方面,Ryan White 和 David A. Forsyth 做了将纹理与阴影结合的探索性工作^[14]; Nick Barnes 和 Zhi Qiangliu^[3]探索了目标先验知识的应用; Gang Zeng 等^[5]开发了一个人机交互式进行形状恢复的小型实验系统。此外,图像中的暗区由于灰度较低无法提取对形状恢复有用的信息,如何处理这些区域也是有阴影恢复形状方法走向实用的一大障碍,需要克服。具体来说,可以进一步开展的研究工作有:

1) 为提高算法的实用性,需要设计更复杂的反射模型和光照模型,如前所述,已有一些比混合模型更复杂的反射模型,但是这项工作尚需努力,在与实际情况相符的同时,兼顾计算的可行性和复杂程度;在这一方面, Oliver Vogel 等^[15]通过对图像进行分割和预处理改善了对一些结构简单的自然图像的处理效果; Qihui Zhu 等^[5]提出引入对物体表面的全局约束来解决一些计算过程中存在的模糊性;

2) 不同光照方向或不同视点获取多幅图像的信息融合或与纹理、立体视觉、结构信息、运动信息等知识的结合;

3) 图像中的暗区由于灰度较低无法提取对形状

恢复有用的信息,如何解决这些区域的处理问题也是有阴影恢复形状方法走向实用的一大障碍,需要克服;

4) 由阴影恢复形状的解的唯一性或存在性的证明。这一点与反射模型的设计和验证一样,需要大量的理论分析和数学推导。

尽管目前由阴影恢复形状算法的处理效果不够理想,很大程度上限制了这类方法的应用,但随着上述问题的改进,这类方法将在机器视觉领域发挥一些独特的作用。现在许多研究者正在为这一前景而努力。

参考文献 (References)

- [1] B. K. P. Horn, M. J. Brooks. Shape from shading. Cambridge: MIT Press, 1989.
- [2] 王怀颖. 细胞神经网络在图像处理中的应用技术研究[D]. 南京航空航天大学, 2007.
- [3] O. Vogel, M. Breuß and J. Weickert. Perspective shape from shading with non-Lambertian reflectance. Proceedings of the 30th DAGM symposium on Pattern Recognition, 2008: 517-526.
- [4] Q. H. Zhu, J. B. Shi. Shape from shading: Recognizing the mountains through a global view. Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2006, 1: 1-8.
- [5] 寇镇淳. 从明暗恢复形状的有理样条方法[D]. 大连理工大学,

- 2005.
- [6] K. M. Lee, C. C. J. Kuo. Shape from shading with a linear triangular element surface model. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, 15(8): 815-822.
 - [7] C. H. Lee, A. Rosenfeld. Improved methods of estimating shape from shading using the light source coordinate system. *Artificial Intelligence*, 1985, 26: 125-143.
 - [8] J. Oliensis. Shape from shading as a partially well-constrained problem. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing: Image Understanding*, 1991, 54: 163-183.
 - [9] J. Malik, D. Maydan. Recovering three dimensional shape from a single image of curved objects. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11: 213-224.
 - [10] V. S. Ramachandran. Perceiving shape from shading. *Scientific American*, 1988, 159: 76-83.
 - [11] M. Ben-Ezra, S. K. Nayar. What does motion reveal about transparency. *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Computer Vision*, IEEE Computer Society, 2003, 1: 1025-1028.
 - [12] H. Ragheb, E. R. Hancock. A probabilistic framework for specular shape-from-shading. *International Conference on Pattern Recognition*, 2002, 3: 513-516.
 - [13] Q. Zheng, R. Chellappa. Estimation of illuminant direction, albedo, and shape from shading. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 13(7): 680-702.
 - [14] R. White, D. A. Forsyth. Combining cues: Shape from shading and texture. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2006, 2: 1809-1816.
 - [15] O. Vogel, L. Valgaerts, M. Breuß and J. Weickert. Making shape from shading work for real-world images. *DAGM-Symposium*, 2009: 191-200.
 - [16] A. Pentland. Shape information from shading: A theory about human perception. *Proceedings of International Conference on Computer Vision*, 1988, 1: 404-413.
 - [17] P. S. Tsai, M. Shah. Shape from shading using linear approximation. *Image and Vision Computing Journal*, 1994, 12(8): 487-498.
 - [18] E. Rouy, A. Tourin. A viscosity solutions approach to shape from shading. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1992, 29(3): 867-884.
 - [19] M. Bichsel, A. P. Pentland. A simple algorithm for shape from shading. *IEEE Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, 1992, 1: 459-465.
 - [20] R. Kimmel, A. M. Bruckstein. Shape from shading via level sets. *Israel Institute of Technology, CIS Report 9209*, 1992.
 - [21] J. Oliensis, P. Dupuis. A global algorithm for shape from shading. *Proceedings of International Conference on Computer Vision*, 1993, 1: 692-701.