

# 一种用于立体感增强的 SFS 改进算法

钱鑫<sup>1),3)</sup> 胡跃辉<sup>2),3)</sup> 吕国强<sup>2),3)</sup> 文江涛<sup>1),3)</sup>

<sup>1)</sup>(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院,合肥 230009) <sup>2)</sup>(合肥工业大学光电技术研究院,合肥 230009)

<sup>3)</sup>(特种显示技术教育部重点实验室,合肥 230009)

**摘要** 表面重建是计算机立体视觉中的一个重要研究领域,SFS(shape from shading)是单帧图像立体感增强的有效方法之一。为了更好地利用 SFS 对图像进行增强,在对朗伯体表面反射模型进行详细分析和对影响 3 维重建结果的关键因素进行讨论的基础上,提出了一种改进的 SFS 算法,并给出了具体的步骤和计算方法。实验表明,该算法的改进改善了立体显示的效果。

**关键词** 立体显示 由阴影恢复形状 表面重建

中图分类号:TP391 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)09-1766-05

## An Improved Algorithm of SFS for Stereo Enhancing

QIAN Xin<sup>1),3)</sup>, HU Yue-hui<sup>2),3)</sup>, LV Guo-qiang<sup>2),3)</sup>, WEN Jiang-tao<sup>1),3)</sup>

<sup>1)</sup>(School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

<sup>2)</sup>(Academe of Opto-electronic Engineering Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

<sup>3)</sup>(Key Laboratory of Special Display Technology, Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

**Abstract** Surface reconstruction is one of the classic problems in computer vision. Extracting surface depth from a shaded image (SFS) is one kind of effective method. In this paper, the Lambertian surface model was analyzed in detail and the key factors touched the result was discussed; based on this, an improved algorithm with particular approach and computational method was proved. Experiments show that our algorithm enhance the perception of stereo display.

**Keywords** stereo display, shape from shading, surface reconstruction

## 1 引言

立体显示技术就是基于视差<sup>[1]</sup>原理发展而来的,目前已经有包括立体眼镜、立体显示器、立体投影设备等在内的多种产品问世。其原理决定了必须同时提供具有视角差的左右视图,观察者才能感受到立体效果,数据源问题因而成为制约立体显示技术发展的一个主要瓶颈。纵观立体显示器的应用领域,实际对象不能保证均为可以实时生成左右视图的 3 维网格模型文件,而且更多的情况下可能是图

像格式或视频(图像序列)文件,而目前尚未出现专门的实时处理软件。

如果能够通过技术手段使得普通的单帧图像得以在立体显示系统中实现 3 维显示,并产生深度感,则将极大地拓展立体显示系统的应用范围,因此研究单帧图像的立体感增强算法,对立体显示技术的推广有重要意义。

单帧图像的表面重构是计算机立体视觉中的一个重要研究领域,它完成了一个从 2 维空间到 3 维空间的映射,这在理论上是病态的。世界各地的研究人员进行了大量的相关研究,并提出了很多算

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA01Z302)

收稿日期:2006-10-23;改回日期:2007-03-26

第一作者简介:钱鑫(1982~),男。现为合肥工业大学测试计量技术及仪器专业硕士研究生。主要研究兴趣为立体显示技术及 3 维重建。E-mail:qianx@tom.com

法<sup>[2-10]</sup>,然而直接移植到立体显示应用上的效果并不理想。为了实现应用层级上的单帧图像的立体感增强,有必要对算法进行针对性的改进。

## 2 常见的立体感增强方法

常见的立体感增强方法包括从阴影恢复3维形状(shape from shading, SFS)<sup>[2-6]</sup>和从纹理恢复3维形状(shape from texture, SFT)<sup>[7-9]</sup>两大类。

其中SFS方法是根据单幅图像中物体表面的明暗变化来恢复表面各点的相对高度。该方法首先基于朗伯体表面反射模型<sup>[3]</sup>建立物体表面形状与图像亮度之间的约束关系;然后根据物体表面形状的先验知识建立关于物体表面形状参数的约束关系,再通过对这些约束关系进行联合求解来得到物体表面的3维形状。常见的SFS算法分为最小值方法、约束传播方法、局部分析法、线性化方法4大类,不仅它们的原理各不相同,而且其算法的正则性、真解逼近程度、求解效率及适用范围也各有侧重。

对于覆盖有纹理的表面,则其纹理将随着表面的倾斜产生相应的尺寸变化。1950年,Gibson首次提出纹理可能会在恢复表面方向上起作用,人们在他的研究基础上,逐步地发展形成了SFT方法,即根据物体表面纹理的尺度变化通过推算表面的倾斜情况来重建3维形状。

比较而言,由于SFS技术更加成熟,不仅适用范围更广,而且并非所有图像中都可以提取出符合特征的纹理,因此基于纹理的方法不具备广泛的适用性。由于灰度是图像必定具备的属性,所以基于明暗变化的情况来重建3维表面的算法具有确切的普适性。

因此本文选取SFS算法作为研究的重点。但由于将现有算法直接应用于立体显示时,常常会出现轮廓不清晰、背景被恢复为外形、相关区域产生“毛刺”等问题,并且造成显示模糊、重影,甚至不能正常显示。为此,本文将具体分析各种产生这些不良的原因,并提出针对性的处理方案,以改善重建后的立体显示效果。

## 3 一种应用于立体感增强的改进SFS算法

### 3.1 朗伯体表面反射模型

所有SFS算法均假设光源为无限远处的点光源,同时简单化、理想化的把物体表面看作是各向同

性的、均匀的朗伯体表面,并且以正交投影成像,以最大限度地简化问题。

根据朗伯体余弦定律,物体表面点图像亮度 $E$ 仅由该点光源的入射角 $\theta_i$ 的余弦决定,可简化为 $E = \cos\theta_i$ ,这就是朗伯体表面反射模型的亮度方程<sup>[3]</sup>。所有的SFS算法都是在这个亮度方程的基础上发展得到的。

根据向量内积运算的关系式,可以将亮度方程进一步转化成以下的形式:

$$E(x, y) = \frac{1 + pp_0 + qq_0}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_0^2 + q_0^2}} \quad (1)$$

这里 $(p, q)$ 是点 $P = (x, y)$ 处的表面梯度,该处入射光的方向为 $(-p_0, -q_0, 1)$ , $E(x, y)$ 表示点 $(x, y)$ 的对应灰度值。 $p, q$ 作为深度值 $Z(x, y)$ 的偏导数,可由 $Z$ 的差商近似表示<sup>[11]</sup>:

$$p = \frac{\Delta Z}{\Delta x} = Z(x, y) - Z(x - 1, y) \quad (2)$$

$$q = \frac{\Delta Z}{\Delta y} = Z(x, y) - Z(x, y - 1) \quad (3)$$

这里可以得到以下两点重要的信息:(1)灰度值的大小相对取决于物体表面法向和入射光方向,图像中最亮的部分总是对应于物体上正对入射光照方向的区域;(2)图像灰度值突变的地方反映该处物体的表面梯度变化最为显著,通常为物体的轮廓部分。

### 3.2 适用于立体显示的改进SFS算法

众所周知,视差产生立体感<sup>[1]</sup>,而轮廓是否清晰、背景是否明确、表面是否光滑、视差是否准确则是决定立体效果优劣的关键因素。对重建效果影响最大的地方是背景、轮廓、“亮斑”区域,但通过如图1所示的图像处理方法来减小不利因素的影响,以修正最终结果,就可以较大幅度地提高立体显示效果。

理想情况下的图像背景应该是单色的,其对应的物理意义是背景处的深度值为定值,而实际情况下由于光的散射作用,使背景中总会有或多或少的色阶变化。在3维重建尤其是全局运算过程中,会将图像整体作为研究对象来对待,在迭代算法的反复作用下,由于这些影响将逐渐累加并且扩散,从而最终影响到重建的结果。而通过分离背景和重新赋值的方法则可以修正这个影响。

图像边缘是图像最基本的特征之一,其携带着图像的大部分信息。边缘存在于图像的不规则结构和不稳现象中,即信号的突变处,由于这些点给出了图像轮廓的位置,因此这些轮廓提供了后续处理

时所需的非常重要的一些特征条件,这就需要对一幅图像进行检测,并提取出它的边缘。现有的大部

分轮廓提取算法都可以满足要求,后续试验中,将用 Canny 算法<sup>[11]</sup>来提取轮廓。

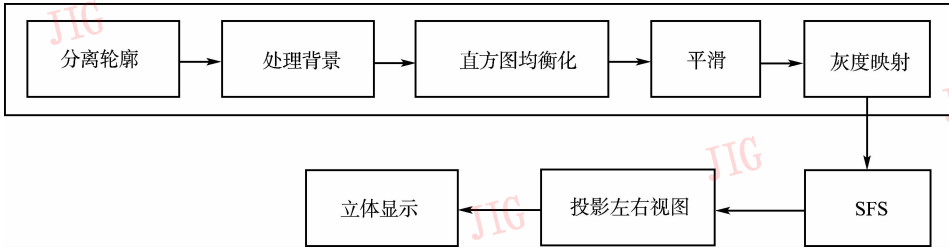


图 1 改进算法流程框图

Fig. 1 Flow chart of improved algorithm

提取轮廓时,首先计算出轮廓线的灰度均值(不包括轮廓内部的实体部分),然后将其赋值给背景区域。这样重建后的背景部分将被确切地恢复在同一高度面上,而且由于背景灰度值和外沿轮廓灰度十分接近,因而重建后边缘轮廓出现“陡峭”斜坡的问题也随之大大改善了。重建后新的轮廓线灰度如下:

$$E_{\text{new}}[x, y] = \begin{cases} \bar{E}_{\text{contour}} & [x, y] \in R_{\text{back}} \\ E_{\text{old}}[x, y] & [x, y] \in R_{\text{object}} \end{cases} \quad (4)$$

由于物体表面总会存在灰度变化较快的局部区域,而重建后该区域将出现较陡峭的坡面,从而导致投影左右视图时会产生毛刺,甚至会因为遮挡而丧失部分有用信息。通常采取直方图均衡化的方法来消除突出的“阶跃”和抑制毛刺的产生。但均衡化的副作用是重建后物体表面高度变化的幅度将减小。考虑到立体显示的具体情况,由于只需要保证各点在 3 维空间的

相互位置关系,就不会影响到立体感,因此上述操作,在使表面光滑的同时,不会造成立体感失真。

对现实物体模型而言,虽然其表面高度是连续的,且明暗度也是连续的,但在 CCD 采样以及图像数字化过程中,由于它们被赋值为邻近的整数。从而造成灰度值大小相同的点,物理上的明暗度可能存在细微差别。同时,由于均衡化也会抹平某些细节部分本来就较小的差异,从而使得这些倾角较小的斜面被错误地恢复为平面。而通过平滑化和灰度映射的方法则可以使这种情况得到改善。

由于平滑化可以减少前面所提到的图形畸变,因而使得图像的灰度可以平滑过渡。因为朗伯体表面是连续均匀的光滑面,所以邻域平均可以在很大程度上恢复该点的情况。如果选取  $m \times n$  大小的邻域作为模板进行均值操作,并设定阈值  $T$  来减小模糊效应,则计算公式如下:

$$E_{\text{new}}(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{M} \sum_{(m, n) \in S} E_{\text{old}}(x, y) & \text{若 } \left| E_{\text{old}}(x, y) - \frac{1}{M} \sum_{(m, n) \in S} E_{\text{old}}(x, y) \right| > T \\ E_{\text{old}}(x, y) & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $S$  是点  $(x, y)$  邻域所包括点的坐标集合,  $M$  是点集  $S$  内坐标点的数目。

平滑化以后,再利用细分灰度值的方法将同样灰度值的点映射得更贴近真值,还原这些差别将使得恢复的曲面更平滑、细腻。具体实现流程如下:先记录图像上所有点的灰度值,并标记图像中所有灰度值为  $g$  的点,计算得到的平滑后的值为  $\hat{g}$ ,假设所有  $\hat{g}$  中的最大值为  $g_{\text{max}}$ ,最小值为  $g_{\text{min}}$ ,整幅图像所有灰度值中紧邻  $g(x, y)$  的分别是  $g_{\text{up}}$ 、 $ad(g_{\text{up}} > g, g_{\text{down}} < g)$ ,则修正值为

$$g_c = g_{\text{down}} + 0.5 + \frac{\hat{g} - g_{\text{min}}}{g_{\text{max}} - g_{\text{min}}} \times (g_{\text{up}} - g_{\text{down}} - 1) \quad (6)$$

修正以后,  $g_{\text{max}}$  被映射到  $g_{\text{up}} - 0.5$ ,  $g_{\text{min}}$  被映射到

$g_{\text{down}} + 0.5$ 。可以从图 2 中清晰地看出,灰度映射后灰度过渡更加平滑细腻,锯齿现象也得到了有效改善。

由于以上改进只针对反射模型,而不涉及算法的具体操作本身,因而适用于所有 SFS 算法。Tsai 算法是一种简单有效的线性化 SFS 算法,它具有收敛快、精度高、运算时间短的特点,为此本文选择 Tsai 算法进行增强实验,以与上述改进做进一步的比较验证。

研究表明,在静态情况下,双眼能够融合的位差<sup>[12]</sup>是:正位差对双眼张角为  $1.570^\circ$ ,负位差对双眼的张角为  $-4.930^\circ$ 。结合这些数据和其他先验知识,在 3 维空间内模拟人眼成像系统,对重建后的模型进行投影映射,就可以得到左右视图,应用于立体显示。



图 2 改进的 SFS 算法处理结果

Fig. 2 Result of improved SFS algorithm

### 4 实验及结论

为验证本文算法的效果,选取了几组不同的 3 维模型,以投影图作为数据源分别进行了两组实验,一组使用原始的 Tsai 线性化算法,一组采用改进后的算法。

实验时,先重建模型,并投影生成所需要得到的左右视图,再以标准的左右视图作为参考标准来比对相关数据。通过比对可以发现,改进后的算法的恢复值与理想值更接近(如图 3 所示),平均相似度由 84.7% 提高到 93%,最终生成的左右视图在合肥工业大学光电技术研究院自研的立体显示器上的观察结果也说明了改进后的算法能有效地取得立体显示效果。

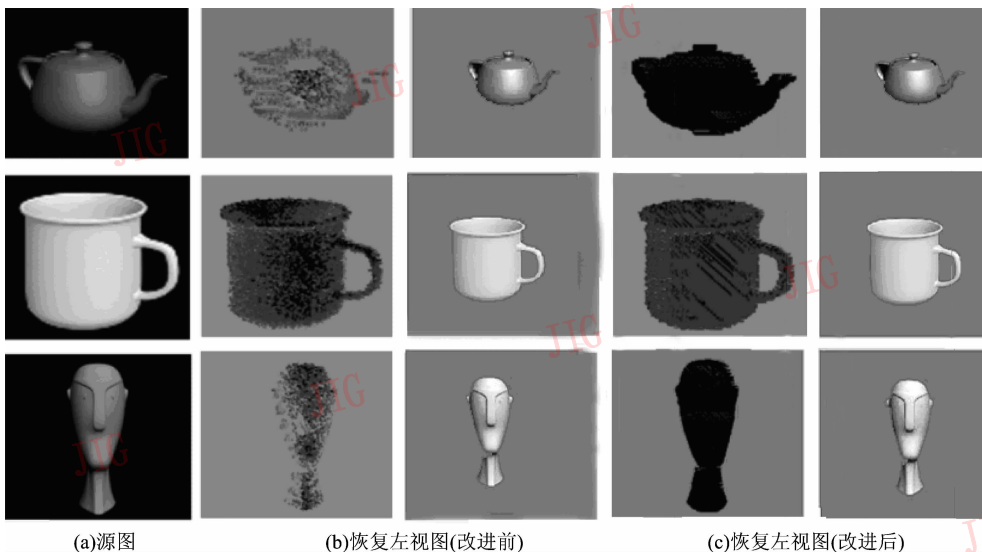


图 3 SFS 算法改进前后的增强结果对比

Fig. 3 Contrast of the improved and the original

由于算法原理的局限性,致使纹理部分(如果存在的话)在重建的过程中可能会被错判为实体,这在应用层级上影响到了立体显示的效果。针对这个问题本文进行了一些研究,并取得了初步成果,限于篇幅关系,将在另外的文章中予以分析报告。

### 参考文献 (References)

- 1 Sadovnik Lev S, Rizkin Alexander. 3-D Volume Visualization Display [P]. United States Patent 5764317, 1998-06-09.
- 2 Horn B K P. Shape from Shading: A Method for Obtaining the Shape of Smooth Opaque Object from one View [R]. MAC TR-79 and AI-TR-232, Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA, USA, 1970.
- 3 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.
- 4 Horn B K P. Height and gradient from shading [J]. International Journal of Computer Vision, 1990, **5**(1): 37 ~ 75.
- 5 Zheng Q, Chellappa R. Estimation of illuminant direction, albedo, and shape from shading [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, **13**(7): 680 ~ 702.
- 6 Tsai P S, Shah M, A fast linear shape from shading [A]. In: Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Champaign, Illinois, USA, 1992:734 ~ 736.
- 7 Gibson James J. The perception of vision surfaces [J]. The American Journal of Psychology, 1950,**58**(3):367 ~ 384.
- 8 Aloimonos J, Swain J. Shape from texture [A]. In: Proceedings 9th International Joint Conference Artificial Intelligence (IJCAI-85) [C], Los Angeles, CA, USA, 1985:92 ~ 931.
- 9 Witkin A D. Recovering surface shape and orientation from texture [J]. Artificial Intelligence, 1981,(17): 17 ~ 46.
- 10 Tsai P S, Shah M. Shape from shading using linear approximation [J]. Image and Vision Computing, 1994, **12**(8):487 ~ 498.
- 11 Canny J. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, **8**(6): 679 ~ 698.
- 12 Liu Wen-wen, Lv Guo-qiang, Deng Shan-xi. Research on the software for setting up bi-viewpoint in Auto stereoscopic 3D display based on direct 3D [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, **11**(3):357 ~ 361. [刘文武,吕国强,邓善熙.基于 Direct 3D 的 3 维自由立体显示软件双视点设置 [J]. 中国图象图形学报, 2006,**11**(3): 357 ~ 361.]