

# 基于 SFS 算法的泡泡纱织物起泡形态模型研究<sup>①</sup>

Surface Shape Reconstruction of Seersucker's Bubble Based on SFS Algorithm

王文正 张瑞林 (浙江理工大学 软件工程研究所 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 阴影恢复形状算法是计算机视觉中的一个重要研究课题,该算法应用于泡泡纱织物三维曲面重建,为今后对泡泡纱织物仿真的研究奠定了基础。提出了一种改进的阴影恢复重建算法,使其更有利用排除屈曲对泡泡曲面建模的影响。先利用传统的 SFS 算法对泡泡纱局部样本图进行表面重建,然后再对得到的数据进一步分析:利用区域峰值抽样并结合 B 样条曲面拟合函数,得到最终的起泡表面曲面模型。实验表明,此方法可以有效的排除细节信息干扰,得到理想的起泡表面模型,为泡泡纱仿真方法的研究奠定很好基础,亦可应用于其他物体的研究。

**关键词:** 阴影恢复形状 泡泡纱 B 样条曲面 起泡模型

泡泡纱织物是以平纹组织织制,其与一般平面织物最大的不同在于其表面呈凹凸泡泡形状,且形状、大小、泡的高低都有不定性。因其特殊的结构外观,越来越受到大众的喜爱,用途也越来越广泛<sup>[1]</sup>。而目前为止,国内外尚无公开发表的相关研究,仅国外个别优秀的织物仿真软件中集成了简单的泡泡纱仿真功能。因此对其表面形态的研究及仿真应用具有重要的意义。由明暗恢复形状(Shape from Shading)是一种根据物体图像灰度的变化来求解物体表面三维形状的方法,最早是 Horn 为了解决月球表面的重构问题于上世纪七十年代最早提出的,近些年来,随着计算机视觉技术、辐射度学和光度学理论的发展,SFS 问题的求解算法取得了长足的进步。在各种重建技术中,SFS 算法以其算法简单、使用方便等卓越性能而引起了许多学者的重视<sup>[2,3]</sup>。其求解过程可以用图像辐照度方程来描述,图像辐照度方程本质上为一阶非线性偏微分方程组,利用图像灰度计算出物体表面的梯度方向,再由表面梯度方向迭代求解离散化后的物体表面高度。本文以典型的泡泡纱织物的起泡样本为出发点,对其起泡的表面形态进行分析及建模。

## 1 SFS 算法介绍

在理想的成像条件下,图像的灰度满足反射图

$$\begin{aligned} \text{函数:} \\ E(x, y) = I(x, y) &= \frac{m \cdot n}{\|m \cdot n\|} \\ &= \frac{m_1 n_1 + m_2 n_2 + m_3 n_3}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2} + \sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2}} \quad (1) \\ &= R(p(x, y), q(x, y)) \end{aligned}$$

其中,物体表面法方向  $n = (n_1, n_2, n_3)$ ,光源方向  $m = (m_1, m_2, m_3)$  或  $(-p_0, -q_0, 1)$ ,  $E(x, y)$ 、 $I(x, y)$  为图像在像素点  $(x, y)$  处的亮度,  $R(p, q)$  为对应物体表面法向量方向  $(p, q)$  的反射图。 $p = \partial Z / \partial x$ ,  $q = \partial Z / \partial y$  或  $p = -n_1/n_3$ ,  $q = -n_2/n_3$  为表面梯度。要想求出物体表面高度  $Z$  只需求解式(1)得出  $(p, q)$ ,然后积分。但该模型所确定的 SFS 问题是病态的,因此为了求解,需要另加约束条件。

Horn 在连续可微域上讨论 SFS 问题,认为已知图像数据与由反射模型所确定的物体表面图像亮度之间存在误差,将亮度方程(1)转换为如下误差函数形式:

$$e = \iint \left[ \lambda (p_x^2 + p_y^2 + q_x^2 + q_y^2) + \mu ((z_x - p)^2 + (z_y - q)^2) \right] dx dy \quad (2)$$

① 基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(Y106148)

收稿时间:2008-07-27

其中,  $\lambda$  和  $\mu$  是拉格朗日常数,  $q_x, q_y, z_x, z_y$  等为离散表面方向。

SFS 模型是个非线性反射函数,考虑到非线性项对重建结果的影响不大,为了防止迭代计算的发散,加快迭代收敛的速度,一个有益的尝试是将非线性的反射图方程线性化,进行泰勒展开。Pentland<sup>[4]</sup>以表面梯度( $p, q$ )为变量对反射函数进行线性化,然后对亮度方程的两边都进行傅里叶变换,整理之后,进行逆傅里叶变换,得到物体表面的高度值。而 Tsai 和 Shah 首次利用后向有限差分方法将反射函数离散化:

$$p = \partial Z / \partial x = z_{ij} - z_{i,j-1}, q = \partial Z / \partial y = z_{ij} - z_{i-1,j}$$

图像辐射方程变成:

$$f(z_{i,j}) = E_{i,j} - R(z_{ij} - z_{i,j-1}, z_{ij} - z_{i-1,j}) = 0$$

然后对上式进行泰勒展开:

$$0 = f(z_{ij}) \approx f(z_{i,j}^{n-1}) + (z_{ij} - z_{i,j}^{n-1}) \frac{\partial f}{\partial z_{ij}}(z_{i,j}^{n-1})$$

令第  $n$  次迭代结果  $z_{i,j}^n = z_{ij}$  则得到:

$$z_{i,j}^n = z_{i,j}^{n-1} - \frac{f(z_{i,j}^{n-1})}{\frac{\partial f}{\partial z_{ij}}(z_{i,j}^{n-1})} \quad (3)$$

$$\text{其中, } \frac{\partial f}{\partial z_{ij}}(z_{i,j}^{n-1}) = \frac{(p+q)(pp_0 + qq_0 + 1)}{\sqrt{1+p^2+q^2} + \sqrt{1+p_0^2+q_0^2}} - \frac{(p_0+q_0)}{\sqrt{1+p^2+q^2} + \sqrt{1+p_0^2+q_0^2}}$$

式中 ( $i, j$ ) 为对应点坐标。

边界条件的输入对迭代的收敛性起着重要作用。通常可以预先知道边界点的表面高度,作为输入条件代入迭代方程可以计算出整体表面高度的唯一解。而边界点的表面方向无法预知,在这种情况下需要引入自然边界的限制条件,即表面方向的偏导数为零,图像 4 个角点的表面方向可简单等于相邻对角元素的表面方向值,图像 4 个边线点的表面方向由内部像素点的表面方向外插值计算。

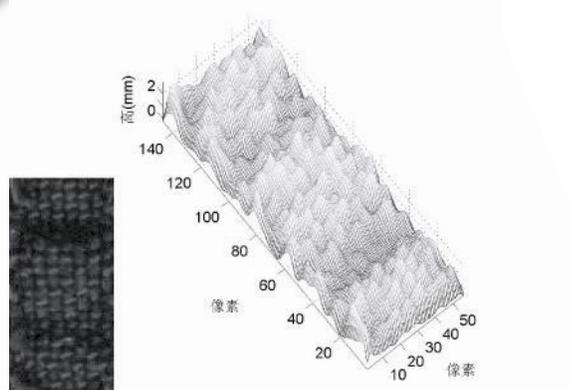
$$\begin{cases} p_{k,0} = \frac{1}{2}(p_{k-1,1} + p_{k+1,1}) \\ p_{k,M-1} = \frac{1}{2}(p_{k-1,M-2} + p_{k+1,M-2}) \\ p_{0,j} = \frac{1}{2}(p_{1,j-1} + p_{1,j+1}) \\ p_{N-1,j} = \frac{1}{2}(p_{N-2,j-1} + p_{N-2,j+1}) \end{cases} \begin{cases} q_{k,0} = \frac{1}{2}(q_{k-1,1} + q_{k+1,1}) \\ q_{k,M-1} = \frac{1}{2}(q_{k-1,M-2} + q_{k+1,M-2}) \\ q_{0,j} = \frac{1}{2}(q_{1,j-1} + q_{1,j+1}) \\ q_{N-1,j} = \frac{1}{2}(q_{N-2,j-1} + q_{N-2,j+1}) \end{cases}$$

其中  $1 \leq k \leq N-2, 1 \leq j \leq M-2$ , 整个图像区域为  $N \times M$ , 从

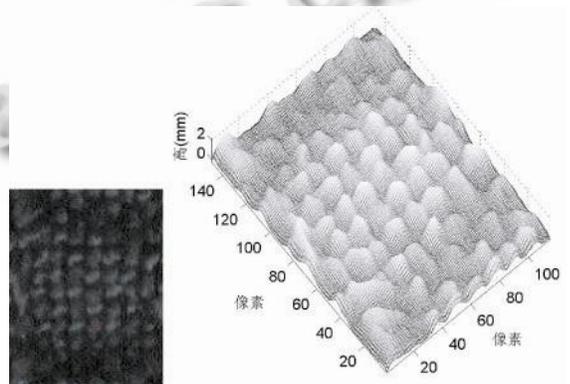
边线点出发可以计算出相邻点的表面方向( $p, q$ ), 进而扩展到所有点的表面方向, ( $k, l$ ) 为对应点坐标。

## 2 算法验证

图像在采集、量化过程中会产生各种干扰噪声,使图像信息被干扰噪声所污染。首先,将泡泡纱样本采集图进行局部提取,再进行图像灰度化及图像平滑处理,最后初使 SFS 算法进行三维重建。初始条件是边界点的高度和表面方向设为零,利用反射图方程,首先计算图像点的表面方向值,进而求得各点的表面高度值,迭代初始的加权因子  $\mu = 0.1, \lambda = 0.2$ 。当表面方向的误差小于设定误差 0.02 时,迭代计算结束,所得的织物表面重建结果如图 1 所示。



(样本 1 及重建图)



(样本 2 及重建图)

图 1 样本及表面形态 SFS 重建图

从图 1 的样本表面形态重建图中可见, SFS 算法可较精确的对织物表面形态进行三维重建,对于每个相交屈曲都能较准确的进行描述。但是本文研究的重点内容之一是对泡泡纱织物“起泡”效果的表面形态进行研究。上述 SFS 算法得到的结果在把握各细节恢

复的效果时，对“起泡”形态的分析产生了明显的干扰，无法从中得到能够描述“起泡”表面形态的曲面模型。

### 3 “起泡”形态重建算法的研究

由于泡泡纱中泡泡的宽度一般在 10mm 最合适，泡宽大于 17mm 或小于 3mm 形成的泡泡效果较差<sup>[5]</sup>。因此，单股纱线的外观信息对泡泡表面凹凸信息有比较大的影响，如何有效的过滤单股纱线的外观干扰，获得充分体现泡泡凹凸外观的数据模型，决定了之后能否建立理想的泡泡外观曲面模型。

根据织物相交的特征，分析基于 SFS 算法得到的织物三维重建图（如图 3.6），可以发现：与实物样本图中“起泡”区域相对应的重建区域，由“泡身”至“泡边”的屈曲重建曲面的峰值呈逐渐减小排列。“泡身”区域的屈曲峰值明显高于“泡边”区域的屈曲峰值。

利用 SFS 实验得到的重建数据进行纬向均值分析，其数学模型如下：

$$f(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L(i, j), \quad 1 \leq j \leq M \quad (4)$$

其中， $f(j)$ 代表第  $j$  行像素高度均值， $L(i, j)$ 代表 SFS 实验数据矩阵中任意位置高度值， $M$ 、 $N$  分别为经、纬方向像素个数。

将样本 1 的 SFS 实验数据进行纬向均值分析，可以得到如图 3 所示的分布曲线。

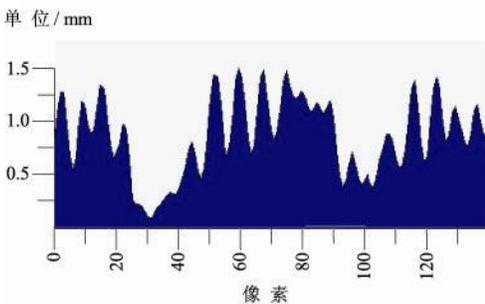


图 2 纬向均值分布图

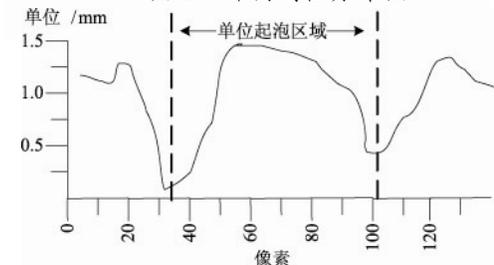


图 3 峰值拟合曲线图

对图 2 中曲线取出所有极大值，并将其按顺序拟合得到一轮廓曲线，如图 3 所示。从峰值拟合曲线图中不难判断出样本的“起泡”区域，及其大致的截面形态。同理，对样本进行经向均值亦能得到类似的分布图。通过分析可以发现，泡泡纱“起泡”形态完全可以以各屈曲的峰值来描述。峰值的变化情况即反应了“起泡”表面的曲面变化情况。因此，可以通过对屈曲的峰值采样做进一步的分析。

在均值分布图中（如图 2），每个波峰即表现为一个纱线交织的屈曲，故可从分布图中计算出采样图中经、纬纱线数，并且各极小值点位置即为纱线边界。以得到的经、纬边界对样本进行屈曲区域划分，如图 4 所示。通过 SFS 得到了离散型的二维高度数组，因此可以很轻松的求出各屈曲的区域的峰值，及其对应的点位置坐标。由于得到的峰值为离散分布的点，还无法反应“起泡”表面形态，根据织物的物理属性可将其近似为光滑曲面上的点。

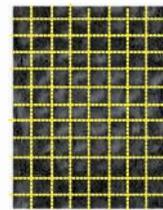


图 4 屈曲区域划分图

目前曲面拟合的方法大致有 3 种：①最小二乘法；②非均匀无理 B 样条拟合法；③非均匀有理 B 样条拟合法。方法①中最小二乘基函数次数难以确定；方法③中权值若选择不当，则会出现很差的拟合效果。由于给定的数据点可能存在噪声和摆动，会出现拟合误差，故在此引入 B 样条曲面自适应拟合算法<sup>[6]</sup>，其算法流程图如图 5。

### 4 算法步骤概述

步骤 1：首先将织物样本进行图像预处理；

步骤 2：根据织物特性进行初使赋值，利用 SFS 算法计算出各点位置的高度；

步骤 3：对步骤 2 中得到的数据分别进行经、纬向均值分析，计算经、纬纱线数及交织屈曲边界限；

步骤 4: 以步骤 3 中的边界对样本进行抽样单位划分, 并且获取各单位区域的峰值点;

步骤 5: 最后将获得的峰值点利用样条曲面自适应拟合算法进行曲面拟合, 得到最终的起泡曲面模型。

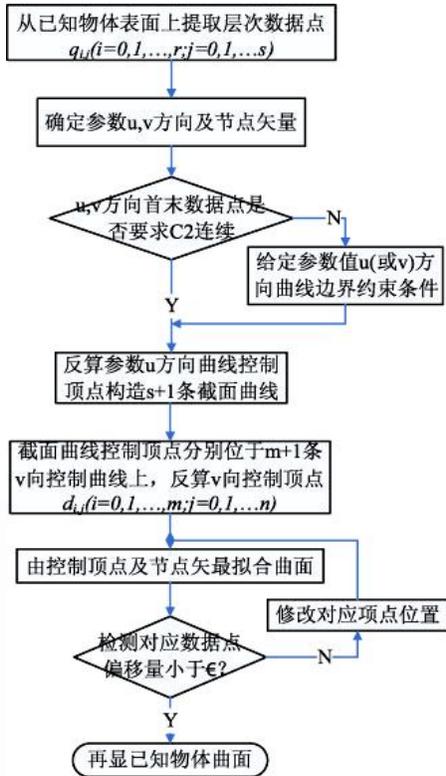


图 5 样条曲面拟合流程图

### 5 实验及结论

按照上述算法步骤进行实验, 可以得到图 1 中两样本的最终“起泡”形态重建图, 如图 6 所示。从实验结果可以发现, 此算法能够有效的排除纱线交织的屈曲对“起泡”整体表面形态重建的影响, 可以得到较理想的“起泡”曲面模型。它为今后泡泡纱仿真算法的研究提供了简单有效的模型基础, 并且也可以应用于其它表面粗糙且有规律的物体形态重建, 具有一定的应用价值。

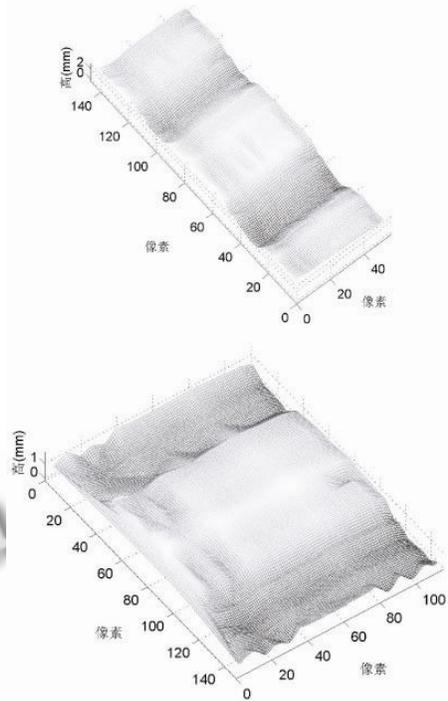


图 6 最终曲面拟合图

### 参考文献

- 1 潘然. 盛行的泡纱织物. 纺织服装周刊, 2007, (22): 34.
- 2 Kyoung ML. Shape from shading with a generalized reflectance map model. Computer Vision and Image understanding, 1997, 67(2): 143 - 160.
- 3 Super BJ, Bovik AC. Shape from texture by wavelet-based measurement of local spectral moments. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1992, (6): 296 - 300.
- 4 Jun WH. Wavelet-Based Shape from Shading. Graphical Models and Image Processing, 1998, 57(4): 343 - 362.
- 5 侯大寅. 泡泡纱织物的成形机理及生产技术探讨. 丝绸, 2004, (3): 26 - 27.
- 6 陈国振, 刘静华. B 样条曲面自适应拟合算法. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(2): 210 - 213.