

# 基于阴影恢复形状的起皱织物表面形态重建研究

杨晓波 黄秀宝

(东华大学纺织学院, 上海 200051)

**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, 该算法应用于织物三维表面重建, 为客观评价织物起皱等级奠定了基础. 提出了一种新的阴影恢复重建算法, 并阐述了该算法的实现步骤和计算方法. 先利用合成图象对算法进行迭代计算并验证, 获得了较为准确的重建图象, 然后再结合真实模板进行重建, 重建准确度较高. 同时说明了该算法可应用于真实织物的表面重建之中, 并可从获得的织物三维轮廓数据中提取特征值, 实验表明, 这些特征值均可从不同侧面表征织物的褶皱程度, 特征值与织物的褶皱程度基本呈线性相关.

**关键词** 计算机图象处理(520·6040) 阴影恢复形状 迭代计算 表面高度

**中图分类号**: TS102.6 TP391.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)02-0181-07

## Surface Shape Reconstruction of Wrinkle fabric Based on Shape from Shading

YANG Xiao-bo, HUANG Xiu-bao

(College of Textiles, Dong Hua University, Shanghai 200051)

**Abstract** Shape from shading is an important research domain in the computer vision, this algorithm can be applied to fabric surface reconstruction, which is the base to evaluate fabric wrinkle degree objectively. A new algorithm of shape from shading is proposed in detail in this paper, including realization process and calculation method. According to reflection map equation, restrict qualification should be added to real image because of noise affection, the whole error expression can be gotten by using restrict qualification, for increasing iteration convergence, reflection map equation is linearization and boundary condition is taken initial value, the 3D surface shape can be gotten through iteration calculation. In detail, firstly, the synthetic image is selected to do iterate calculation, which can acquire the reconstructed image exactly, and then the real replica is imported to test this method, the precision of result is very high; this algorithm can be applied to reconstruct the shape of real fabric, the wrinkle feature parameters are proposed in this paper, which can be extracted from the 3D contour data of surface shape. The result shows that these feature values can reflect the fabric wrinkle degree from different sides; it has closely linear correlation between feature values and fabric wrinkle degree, which can be used to assess fabric wrinkle degree objectively.

**Keywords** Computer image processing, Shape from shading, Iteration calculation, Surface height

## 0 引言

根据阴影恢复形状(shape from shading)的方法是 Horn<sup>[1]</sup>最先提出的,它是计算机视觉中三维数据被动获取的重要手段之一.空间物体表面取向的逐渐变化引起图象的灰度平滑变化,阴影恢复形状算法就是解决在一定的约束条件下,从平滑变化的灰度图象上获取表面取向的信息.这种方法与其他三维信息获取方法的不同之处在于,它不需要多幅图象,而是只

根据一幅灰度图象,即可计算物体表面形状.

由阴影恢复形状的算法近几年发展迅速,且已经在遥感图象中得到了应用,并逐渐向其他领域渗透.主要的算法有利用遮挡边界的信息由阴影恢复形状<sup>[2]</sup>,物体上的遮挡边界和自遮影边界可以提供丰富的三维信息,但通常其表面方向为无穷大,通过引入高斯球的概念,可使这一问题得到解决<sup>[3]</sup>;由法线方向计算表面高度的重建算法<sup>[4,5]</sup>,一般需引入反射图模型来完成,但因反射图模型有病态特征,所以许多研究人员提出了利用正则化方法和表面约束条件,由

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金项目(01D03)

收稿日期:2001-12-24;改回日期:2002-08-26

图象灰度计算出物体表面方向的唯一解<sup>[6~9]</sup>;采用正交多项式实现阴影恢复形状的算法<sup>[10~15]</sup>,是将整个图象区域分割成许多小窗口,再对每一窗口进行迭代运算,最后拼接而成,难点在于拼接处能否平滑过渡。

本文首次将阴影恢复形状的算法引入织物表面重建之中,以期达到非接触性地检测织物的外观,为客观评估织物的表面形态(如起皱等级)打下一个良好的基础。

## 1 算法介绍

### 1.1 迭代公式

在理想的成像条件下,图象的灰度满足反射图方程<sup>[6]</sup>:

$$I(x, y) = R(p, q) = \frac{\rho(1 + p\rho_x + q\rho_y)}{(1 + p^2 + q^2)^{1/2}(1 + \rho_x^2 + \rho_y^2)^{1/2}} \quad (1)$$

其中  $(p, q) = (dz/dx, dz/dy)$  为表面方向,  $R(p, q)$  是对应表面方向  $(p, q)$  的反射图,  $\rho$  为反射系数,  $(\rho_x, \rho_y)$  为光源入射方向,  $I(x, y)$  为图象的灰度。由阴影恢复形状就是由图象灰度  $I(x, y)$  计算出物体的表面方向  $(p, q)$ 。为了解决反射图方程的病态特征,引入以下的约束条件(为方便起见,将  $I(x, y)$  简写为  $I$ ,  $R(p, q)$  简写为  $R$ )。由于实际图象中含有噪声,故约束方程引入光强误差

$$E_1 = \iint (I - R)^2 dx dy \quad (2)$$

对表面方向进一步约束,引入表面光滑误差

$$E_2 = \iint (p_x^2 + p_y^2 + q_x^2 + q_y^2) dx dy \quad (3)$$

其中,  $p_x = \frac{\partial p}{\partial x}$ ,  $p_y = \frac{\partial p}{\partial y}$ ,  $q_x = \frac{\partial q}{\partial x}$ ,  $q_y = \frac{\partial q}{\partial y}$ 。

离散图象的离散表面方向  $(z_x, z_y)$ , 同连续的表面方向  $(p, q)$  存在一定差别,为此引入梯度一致性误差

$$E_3 = \iint [(z_x - p)^2 + (z_y - q)^2] dx dy \quad (4)$$

融合表面高度和灰度信息,将 3 种约束条件合在一起,得到整体误差表达式

$$E = E_1 + \lambda E_2 + \mu E_3 = \iint [(I - R)^2 + \lambda(p_x^2 + p_y^2 + q_x^2 + q_y^2) + \mu((z_x - p)^2 + (z_y - q)^2)] dx dy \quad (5)$$

其中,  $\lambda$  和  $\mu$  分别为表面光滑误差和梯度一致性误差的加权因子。

对于理想的光滑表面,整体误差为零,而对于实际表面,每个误差项都有一定的影响。令整体误差  $E$

和梯度一致性误差  $E_3$  趋于最小,可得到

$$\begin{cases} \lambda \Delta p = -(I - R)R_p - \mu(z_x - p) \\ \lambda \Delta q = -(I - R)R_q - \mu(z_y - q) \\ \Delta z = p_x + q_y \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $R_p, R_q$  分别为方向梯度  $p$  和  $q$  的反射图方程。

引入拉普拉斯离散化近似算子

$$\{\Delta f\}_{k,l} \approx \frac{k}{\varepsilon^2} (\bar{f}_{k,l} - f_{k,l}) \quad (7)$$

其中,  $\bar{f}$  代表表面方向  $f$  的平均值,  $\varepsilon$  表示像素点之间的距离,利用式(7)将式(6)展开,可以得到关于梯度和高度的离散计算公式

$$\begin{cases} (k\lambda' + \mu)p_{k,l} = (k\lambda' \bar{p}_{k,l} + \mu z_x) + (I - R)R_p \\ (k\lambda' + \mu)q_{k,l} = (k\lambda' \bar{q}_{k,l} + \mu z_y) + (I - R)R_q \\ \frac{k}{\varepsilon^2} z_{k,l} = \frac{k}{\varepsilon^2} \bar{z}_{k,l} - (p_x + q_y) \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\lambda' = \lambda/\varepsilon^2$ , 由上式可以得到最终的迭代公式。

整体误差中包含了 3 个误差项的综合作用,改变误差项加权因子的大小,可以提高由灰度恢复高度的准确性,由于引入了梯度一致性误差,可以在计算表面方向的同时,得到表面高度,通过调整表面光滑加权因子的大小,可以使计算结果更准确地逼近真实值。

### 1.2 反射图方程的线性化

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线性化。通常采用泰勒公式,以表面方向的上一次迭代结果作为参考点,得到反射图的线性化近似表示

$$R(p^{(n+1)}, q^{(n+1)}) \approx R^{(n)} + (p^{(n+1)} - p^{(n)})R_p^{(n)} + (q^{(n+1)} - q^{(n)})R_q^{(n)} \quad (9)$$

其中,  $R^{(n)}, R_p^{(n)}, R_q^{(n)}$  为  $R(p^{(n)}, q^{(n)})$ ,  $R_p(p^{(n)}, q^{(n)})$ ,  $R_q(p^{(n)}, q^{(n)})$  的简写。

将式(9)代入式(8)可得

$$\begin{cases} (\lambda'' + R_p^{(n)2})\delta p_{k,l} + R_p^{(n)}R_q^{(n)}\delta q_{k,l} = (k\lambda' \delta \bar{p}_{k,l} + \mu \delta z_x) + (I - R^{(n)})R_p^{(n)} \\ R_p^{(n)}R_q^{(n)}\delta p_{k,l} + (\lambda'' + R_q^{(n)2})\delta q_{k,l} = (k\lambda' \delta \bar{q}_{k,l} + \mu \delta z_y) + (I - R^{(n)})R_q^{(n)} \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $\lambda'' = k\lambda' + \mu$ ,  $\delta$  表示表面方向  $(p, q)$  相对于参考点的变化量。

这样,将表面方向计算的非线性公式转换为计算表面方向变化量  $(\delta_p, \delta_q)$  的线性公式,最后通过下式计算出表面方向  $(p, q)$  的值

$$\begin{cases} p_{k,l}^{(n+1)} = p_{k,l}^{(n)} + \delta p_{k,l} \\ q_{k,l}^{(n+1)} = q_{k,l}^{(n)} + \delta q_{k,l} \end{cases} \quad (11)$$

关于表面高度  $z$  的计算,公式不变,通过反射图

的线性化,可以增强迭代的收敛性,同时也利于采用各种线性迭代加速算法.

### 1.3 边界条件

边界条件的输入对迭代的收敛性起着重要的作用.通常可以预先知道边界点的表面高度,其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.图象 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,图象 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.

$$\begin{cases} p_{k,0} = \frac{1}{2}(p_{k-1,1} + p_{k+1,1}) \\ p_{k,M-1} = \frac{1}{2}(p_{k-1,M-2} + p_{k+1,M-2}) \\ p_{0,l} = \frac{1}{2}(p_{1,l-1} + p_{1,l+1}) \\ p_{N-1,l} = \frac{1}{2}(p_{N-2,l-1} + p_{N-2,l+1}) \end{cases} \quad q \text{ 如 } p \text{ 同样计算 (12)}$$

其中,  $1 \leq k \leq N-2, 1 \leq l \leq M-2$ , 整个图象区域为  $N \times M$ .

由图象灰度获得表面高度和方向的图象处理算法流程图如图 1 所示.

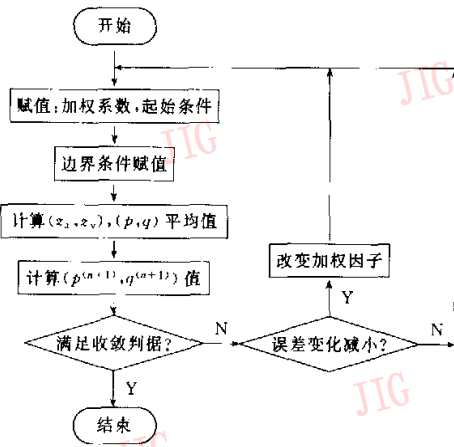


图 1 由图象灰度获得表面高度和方向算法流程图

## 2 实验结果

### 2.1 合成图象验证

为了验证阴影恢复形状算法的可靠性,合成图象是检验图象处理算法的简便方法.所谓合成图象,就是利用计算机构造出的三维立体图象,来模拟真

实图象.这样做的好处是图象不受外界干扰,无噪声影响.光源方向用入射倾角和斜角  $(\varphi, \theta)$  来表示,  $S_0(\varphi, \theta) = (30^\circ, 45^\circ)$ , 则  $(p_s, q_s) = (0.408, 0.408)$ . 图象尺寸采用  $256 \times 256$ , 为提高计算速度,将原图象缩小为  $32 \times 32$ . 首先令迭代初始的加权因子  $\mu=1.0, \lambda=0.2$ , 表面方向  $(p, q)$ , 表面方向离散值  $(z_x, z_y)$  和表面高度  $z$  数组中的元素为零. 令迭代的边界条件为边界高度值为零, 采用梯度一致性误差的变化量作为迭代收敛的判据. 首先构建合成图象如图 2 所示.

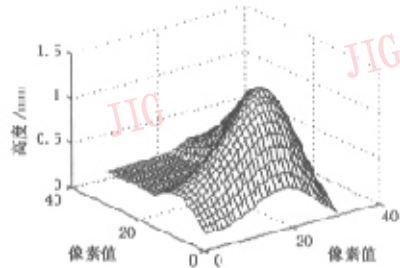


图 2 合成图象

通过合成图象产生光照图象(图 3), 进而利用阴影恢复形状算法重建三维图象(图 4).

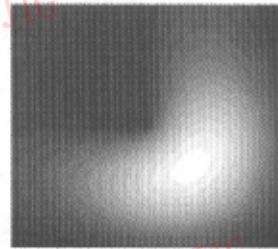


图 3 光照图象

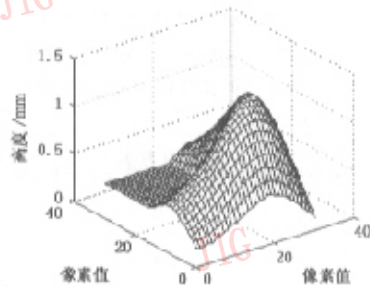


图 4 重建图象

为了验证重建结果的准确性,提取合成图象与重建图象的截面进行对比,对比结果如图 5 所示.

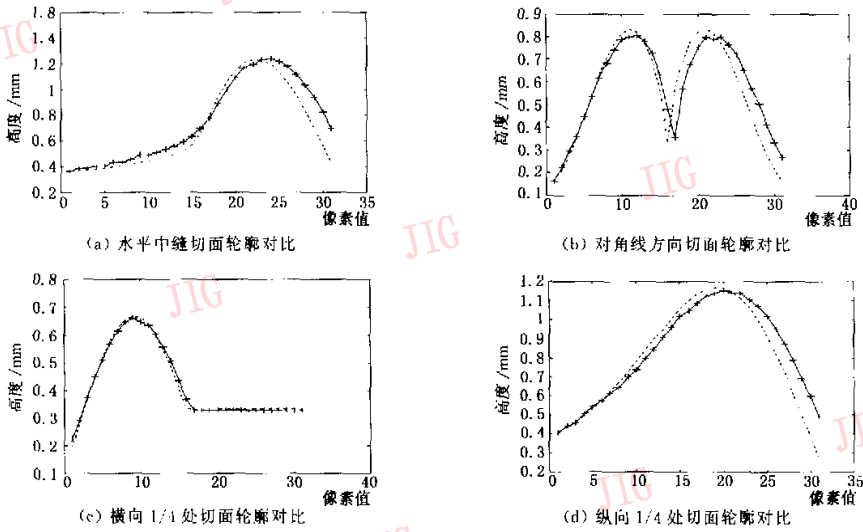


图5 合成图象与重建图象的截面对比

(—:合成图象截面;+ :重建图象截面)

从图5可见,重建图象截面与合成图象截面从各个方向都吻合较好,这说明重建效果较好.为了进行定量描述,采用几个统计值来计算重建图象的误差.

(1) 总体平均误差

$$M_E = |\bar{z}_1 - \bar{z}_2| \quad (13)$$

其中,  $\bar{z}_1$  代表合成图象的高度平均值,  $\bar{z}_2$  代表重建图象的高度平均值.

(2) 总体均方差

均方差  $S_E$  为

$$S_E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z(i) - \bar{z}(i))^2} \quad (14)$$

其中:  $N$  代表像素点数,  $z(i)$  代表图象各像素的高度值  
总体均方差 = |合成图均方差 - 重建图均方差|

(3) 总体极差

极差 ( $T_E$ ): 像素点中高度最大值与最小值的差异

$$T_E = \max(z(i)) - \min(z(i)) \quad (15)$$

总体极差 = |合成图极差 - 重建图极差|

(4) 均方差率

$$\text{均方差率} = \frac{\text{总体均方差}}{\text{合成图均方差}} \times 100\% \quad (16)$$

(5) 准确率

$$\text{准确率} = 1 - \text{均方差率}$$

合成图象与重建图象误差对照如表1所示.

由表1可见,合成图象与重建图象的平均误差为0.0995,均方差率仅为4.84%,准确度超过90%.因此,用阴影恢复形状算法重建三维图象是可行的.

表1 误差对照

总体平均误差 (mm)	总体均方差 (mm <sup>2</sup> )	总体极差 (mm)	均方差率 (%)	准确率 (%)
0.0995	0.0154	0.1103	4.84	95.16

2.2 真实模板验证

下面采用真实模板进行实验,所用模板是依照美国AATCC标准制定并颁布的标准模板,它将织物的褶皱等级分为5级六大类,实验时,CCD摄像机焦距  $f = 16\text{mm}$ ,摄像机到织物的距离  $Z_0 = 1000\text{mm}$ ,图象大小为  $128 \times 128$  pixels,为提高运算速度,将图象压缩成  $64 \times 64$  像素点,令光源方向从斜上方入射,入射角和斜角分别为  $45^\circ, 135^\circ$ ,获得织物的光照图象如图6所示.

采用阴影恢复形状算法重建织物的表面形状,初始条件将边界点的高度和表面方向设为零,运用VC++和Matlab计算机语言混合编程,重建图象如图7所示.

从图中可以看出,褶皱等级越高,如1,2级,表面起伏越剧烈;褶皱等级越低,如4,5级,表面起伏越平缓,这与实际情况较为符合.利用获得的图象表面高度值可以得到反映织物起皱程度的特征值,从而定量地描述织物的起皱程度.本文所采用的特征值为:粗糙度、分形维数、表面面积、平均偏移量.这些特征值都直接或间接地反映了织物的表面起皱情况,求这些特征值的具体算法参见文献[16]~文献[19].

从不同褶皱等级的织物三维重建数据中提取以

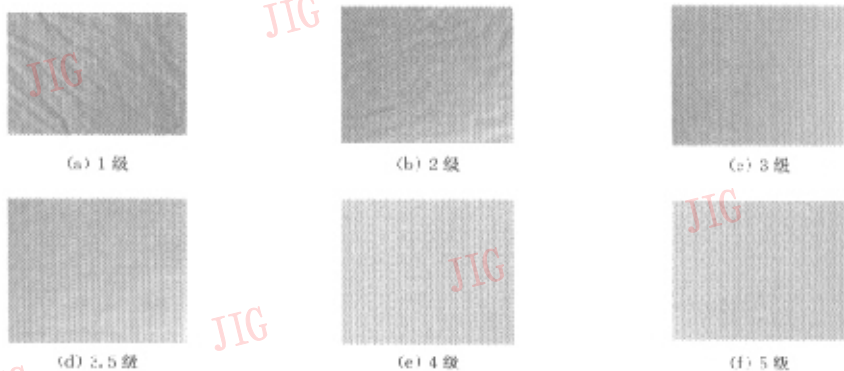


图 6 5 级织物褶皱模板光照图像

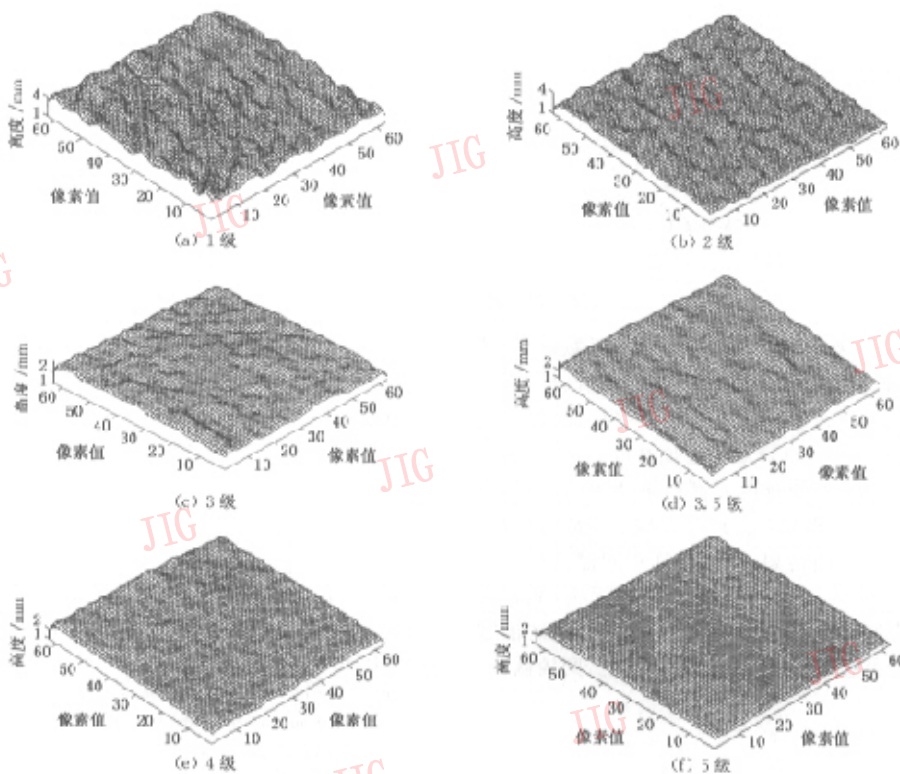


图 7 5 级织物模板二维重建图

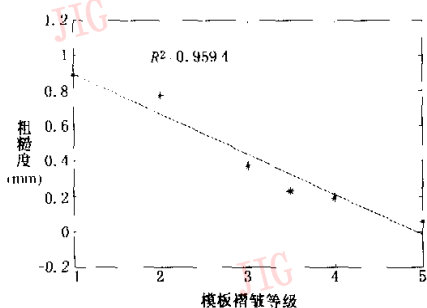
上特征参数,结果见表 2。

从表 2 可以看到,褶皱程度越高,其特征值越大,反之则越小。如把特征值与褶皱程度作一线性拟合,则各特征值与褶皱程度的相关系数  $R^2$  均在 0.9 以上(图 8)。

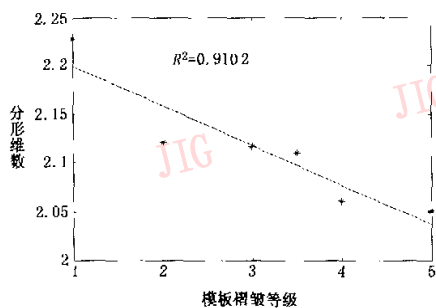
从图 8 可见,以上特征参数与褶皱等级都有着很好的相关性,可以较好地表征织物的起皱程度。其

表 2 特征参数与褶皱程度关系表

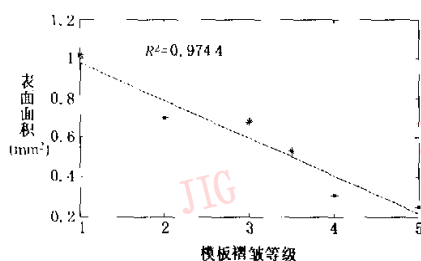
褶皱程度	粗糙度 (mm)	分形维数	表面面积 (mm <sup>2</sup> )	平均偏移量 (mm)
1 级	0.8810	2.2275	1.0175	1.5012
2 级	0.7709	2.1210	0.7013	1.4022
3 级	0.3678	2.1167	0.6771	1.2349
3.5 级	0.2318	2.1092	0.5321	0.7011
4 级	0.1910	2.0812	0.3059	0.3912
5 级	0.0571	2.0510	0.2510	0.4579



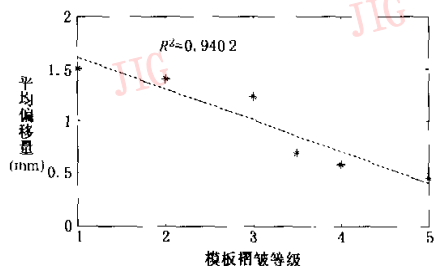
(a) 粗糙度与褶皱程度相关图



(b) 分形维数与褶皱程度相关图



(c) 表面面积与褶皱等级相关图



(d) 平均偏移量与褶皱等级相关图

图8 特征参数与褶皱等级相关图

中表面面积、粗糙度与褶皱等级的相关系数最高,这是因为:表面面积是计算相邻行(或列)的高度差异,可以较直接地反映织物的表面起伏变化,因而相关系数较高;粗糙度是计算织物表面高度的标准方差,也较直接地反映了织物的表面高度变化情况,相关系数也较高。而分形维数是以尺度数为基础,先将织物三维表面进行网格划分,再计算不同褶皱程度的分维数,由于存在多次变换,信息有所丢失,故相关系数有所降低。从以上分析表明,越能直接反映褶皱程度的特征参数,相关系数便越高,反之,则较低。

### 3 结论

本文对由阴影恢复形状算法进行了详细分析,并提出了实现算法的具体步骤和计算方法。首先采用合成图象来检验阴影恢复形状算法的准确性,然后利用真实织物模板重建其三维表面形状,并从不同褶皱等级的轮廓数据中提取特征值,进行定量分析,证明特征值与褶皱等级有较好的相关性,可以作为织物褶皱等级评判的依据,也说明了该算法可以基本恢复出物体的外形形状,若引入光源的特性参数和非朗伯表面的反射定律,可望获得更准确的表面高度值。

### 参考文献

- Horn B K P. Obtaining shape from shading information[A]. In: Brooks M J ed. Shape from Shading[C]. Cambridge, MA: MIT Press, 1989, 123~171.
- Sheng Jinhua. A three-dimensional image processing system based shape from shading[J]. Pattern Recognition & Artificial Intelligence, 1991, 4(4): 46~52.
- Ikeuchi K, Horn B K P. Numerical shape from shading and occluding boundaries[J]. Artificial Intelligence, 1981, 17(2): 141~185.
- Wu Z Q, Li L X. A line-integration base method for depth recovery from surface normal[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1988, 43(1): 53~66.
- Lee Kyoung Mu, Kuo C. Jay. Shape from shading with a generalized reflectance map model[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1997, 67(2): 143~160.
- Horn B K P, Brooks M J. The variation approach to shape from shading[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1986, 33(4): 174~208.
- Horn B K P. Height and gradient from shading[J]. International Journal of Computer Vision, 1990, 5(1): 57~75.
- Bruckstein A M. On shape from shading[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1988, 44(2): 139~154.
- Kimmel R, Bruckstein A M. Global shape from shading[J].

- Computer Vision and Image Understanding, 1995, 62(3): 360~369.
- 10 Kim Bang Hwan, Park Rae-Hong. Shape from shading and photometric stereo using surface approximation by legendre polynomials[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1997, 66(3):255~270.
- 11 Frankot R T, Chellappa R. A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms[A]. In: Filipski edi. Intell. PAMI-10: IEEE Trans. Pattern Anal. [C]. New York: AJ Press, 1988;439~451.
- 12 Brooks M J, Horn B K P. Shape and source from shading[A]. In: Image Proceedings, 1985 Int. Joint Conf. Artif. Intell. [C], Los Angeles, 1985;932~936.
- 13 Horn B K P, Brooks M J. The variational approach to shape from shading [J]. Comput. Vision Graphics Image Process, 1986, 33(2): 174~208.
- 14 Szeliski R. Fast shape from shading [J]. Comput. Vision Graphics Image Process, 1991,53(1):129~153.
- 15 Malik J, Maydan D. Recovering three dimensional shape from a single image of curved objects \_A]. In: Filipski edi. Intell. PAMI-11: IEEE Trans. Pattern Anal. [C]. New York: AJ Press, 1989;555~566.
- 16 Fan J, Hui P L. Objective evaluation of pucker in three-dimensional garment seams[J]. Textile Res. J, 1999,69(7):467~472.
- 17 Tac Jin Kang, Jae Yeol Lee. Objective evaluation of fabric wrinkles and seam puckers using fractal geometry[J]. Text. Res. J, 2000,70(6): 469~475.
- 18 Young J N, Behnam F. Assessing wrinkling using image analysis and replicate standards [J]. Textile Res. J, 1995, 65(3): 149~157.
- 19 Kawabata S, Niwa M. An experiment on human sensory measurement and its objective measurement, case of the measurement of a seam pucker level[A]. In: Proc. 25<sup>th</sup> Textile Research Symposium[C]. Japan, Fuji M, 1996;85~88.



**杨晓波** 1971年生,1994年获西北纺织工学院工学学士学位,1998年获西北纺织工学院工学硕士学位,现为东华大学纺织工程专业博士生.主要研究方向为纺织品表面纹理与形态的计算机视觉分析和模式识别.



**黄秀宝** 1935年生,教授,博士生导师,1963年获华东纺织工学院工学硕士学位,1979~1982年为英国里兹大学访问学者,现在东华大学工作.主要研究方向为纺织表面纹理图象的计算机视觉分析.