基于微观网点的SFS改进算法研究

王茜,王琪

(南京林业大学,南京 210037)

摘要:目的对原有明暗恢复形貌算法(SFS)进行改进,以提高调幅网点立体形态还原精度。方法 通 过显微测试系统准确采集网点灰度图像,后利用改进的明暗恢复形貌算法对光照参数进行八邻域估 计,得到点光源的偏角和倾角,从而对调幅网点进行三维立体还原。结果 与原有算法相比,改进的算 法精确且直观地构建了点的三维立体模型,真实反映了印刷过程中网点传递的具体情况。结论 加入 光照参数估计后的形貌恢复算法是微观物质三维形态还原的有效工具,可以提高提取网点微观立体 形态的精度,为进一步从源头上控制印刷质量提供思路。

关键词:微观立体;改进SFS算法;光照参数估计

中图分类号: TS801.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2016)01-0134-05

Improved SFS Algorithm Based on the Micro Dot

WANG Qian, WANG Qi

(Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

ABSTRACT: The original shaping from shading (SFS) algorithm was adopted to improve the restoring accuracy of the morphology of micro dot. On the basis of the gray image of dot accurately collected by the micro test system, the improved SFS algorithm added with the eight neighboring estimations of the illumination parameters was adopted to construct the 3D resoration of amplitude–modulated dots. Compared to the original algorithm, the improved algorithm accurately and visually constructed the 3D model of the printing dot, which accurately reflected the transferring conditions during the process of printing. The improved algorithm with the estimation of the illumination parameters was an effective tool for 3D restoration of micro dot morphology, which can improve the accuracy of extracting the micro 3D morphology of dots, providing ideas for further control of printing quality.

KEY WORDS: micro 3D; improved SFS algorithm; estimation of illumination parameters

网点是构成印刷图像的最小结构,微观网点的 立体形态特性会对图像复制质量产生本质影响,因 而迫切需要选择一种高精度工具对网点立体形态进 行还原^[1-2]。明暗恢复形状SFS(Shape From Shading) 算法^[3-4]是计算机视觉中恢复图像形貌的重要手段。 该算法的核心思想是根据数字灰度图像的灰度信息 进行亮度分析和转换,进而恢复其表面三维形状。该 算法目前已得到了较多的应用,Josep^[5]指出在遥感领 域方面,应用SFS方法可以对地面各种地理形貌实现 非接触测量获取高程信息,提供一个虚拟的三维参考 模型,为勘探人员丈量地形、绘制地形图提供了极大 的便利。Robles⁶⁹提到依据该算法提取三维表面形貌 特征对人脸实现身份识别能够大大提高识别效率,同 时有利于缩小错判的机率。Blinn¹⁷说明了SFS方法在 医学图像处理方面的应用,通过对分割提取出的人体 器官、软组织或病变体进行三维重建和显示,便于医

收稿日期: 2015-04-13

基金项目: 江苏省普通高校学术学位研究生科研创新计划(KYLX_0881)

作者简介:王茜(1991一),女,江苏泗洪人,南京林业大学硕士生,主攻图文处理与印品质控。

通讯作者:王琪(1971一),女,河南上蔡人,博士,南京林业大学副教授、硕导,主要研究方向为色彩管理与控制。

生从多角度、多层次进行观察和分析。

SFS算法在已确定的 Lambertian 光照反射模型 下,根据物体表面形态与二维图像亮度之间的函数对 应关系,最终获取其表面各点的相对高度¹⁸。在实际 情况下,光照参数是未知的,因而其准确性还不能够 达到很高的要求,这就对该算法的应用产生了一定程 度的限制。现有的研究中,SFS算法一直是宏观形貌 恢复的主要手段,其在微观形貌的恢复还鲜有研究, 且也并未对恢复后图像的精度进行说明。因而在原 有 SFS 算法的基础上,对光照参数进行八邻域估计, 希望得到点光源的偏角和倾角,能够有效提高算法精 度,使其能够应用于微观领域。文中从微观角度出 发,运用加入光照参数估计的 SFS 化方法,考察其在 提取印刷网点三维形态方面的应用性。

1 SFS算法

一般的 SFS 算法总假设光源方向是己知的,即当 光源为无限远处点光源,投影为正交投影,表面反射 为朗伯体反射时,在这种假定条件下,根据 cosine 法 则,物体表面某一点亮度值 L 仅由该点光源的入射角 余弦值决定,即 L=cos β ,朗伯体反射模型见图 1。若 设物体表面的法向量为 T=(h,v,-1),点光源 T_d方向 为(h_d , v_d ,-1),光源与物体表面法向量的夹角为 β ,可 根据空间内积性质,求得物体表面亮度 L。由朗伯体 反射的定义和性质可知,物体表面点的辐照度函数即 亮度 L_{x,v}应与入射光的反射函数 R_{h,m}相等。最终得出 物体表面的辐照方程式见式(1)。

$$L_{x,y} = \cos \beta = R_{h,v} = \frac{h_{d}h + v_{d}v + 1}{\sqrt{h_{d}^{2} + v_{d}^{2} + 1}} \sqrt{h^{2} + v^{2} + 1}$$
(1)



图1 朗伯体反射模型 Fig.1 Lambertian surface reflection model

2 光照参数估计

在之前的实验研究下,需要对实验环境严格要求,

其光照参数是预先设定好的,即在反射函数*R_h*, 中, *h*_d, *v*_a是给定的,但环境没法预设,因此光照参数未知,此时运用辐照方程无法求解,从而无法正确恢复物体表面形状^[9-10]。由此需要采取措施来根据二维灰度图像各像素的亮度值来有效地估计出光照参数,见图2。



图 2 光源的倾角和偏角 Fig.2 The dip angle and drift angle of the light source

在进行估计的过程中,假设物体表面法向量在 三维空间中的分布一致,通过图像上各像素点的八 邻域点对光源仰角进行局部估计。设物体表面偏角 σ 和倾角 ρ ,表面点的法向矢量为 $n=(\sin \rho \cos \sigma$, $\sin \rho \sin \sigma_1,\cos \rho$)。假设物体局部形状为球形表面, 其上任意一点Q的坐标为 $(x,y,z_{x,y})$ 。对于沿着 \vec{s} 方 向的一个小增量 $\vec{s} = (\delta x, \delta y), 则(\sigma, \rho)$ 相应的增 量可以表示为 $(\delta \sigma_s, \delta \rho_s)$ 。为表面点的倾角沿着 \vec{s} 方向选取不同的方向,一般默认八邻域方向^[9],则有 $d\vec{L} = B\vec{X}$,B为八邻域的方向矩阵, $\vec{X} = [x_i, y_i]^T$ 为 光照方向在点(x,y)上x沿 \vec{s} 方向的局部估计值。最 终,可得偏角估计的计算公式为:

$$\eta_{1} = \arctan\left\{\frac{L_{x,y}\left\{\frac{y_{l}}{\sqrt{\hat{x}_{l}^{2} + \hat{x}_{l}^{2}}}\right\}}{L_{x,y}\left\{\frac{\hat{x}_{l}}{\sqrt{\hat{x}_{l}^{2} + \hat{y}_{l}^{2}}}\right\}}\right\}$$
(2)

式中:*L*_{x,y}{·} 为把图像经过预处理后其上所有 像素点所计算出来的均值。

理想表面的倾角和偏角是独立的,且表面点的偏 角无任何取值倾向性,而对于 ρ 而言,只有面向视点 的面可见,其取值范围为 $[0,\frac{\pi}{2}]$,在单位面积内具有 倾角 ρ 的小平面的投影面积为 cos ρ ,因而 ρ 在图像 平面中的概率分布密度为 $f_{\delta_{2}} = \cos\rho$,倾角和偏角的 联合概率密度为 $f_{\sigma\rho} = f_{\sigma_{1}} \cdot f_{\rho} = \frac{\cos\rho}{2\pi}$ 。对任意像素 而言, 若 ρ 大于 $\frac{\pi}{2}$, 则物体表面不能被照射到, 其亮度 值为0。设光源方向的偏角为 η_1 ,光源倾角为 η_2 ,这 样实际的反射图有以下形式:

$$L_{\varphi,\rho} = \max \{ \cos(\sigma - \eta_1) \sin \eta_2 \sin \rho + \cos \eta_2 \cos \rho, 0 \}$$
(3)

 $\cos \eta_2 \cos \rho_0$

 $\pm \mp \cos(\sigma - \eta_1) \sin \eta_2 \sin \rho + \cos \eta_2 \cos \rho = 0$ 是椭圆方程,由其对称性可知,各像素亮度的一阶和 二阶中心距 \overline{L} 和 \overline{L} 均与 η_2 有关,分别记为 f_{1,η_2} 和 f_{2,η_2} , 为简化方程,将亮度归一化后,根据 $\cos \eta_2$ 的七级泰勒 展开式来逼近 f_{1,η_2} 和 f_{2,η_2} ,令 $f_{3,\eta_2} = f_{1,\eta_2} / \sqrt{f_{2,\eta_2}}$,最终 得到倾角估计值见式(4),当 $f_{3,n} \leq 0.96191$ 时, η_2 存 在唯一解,当 $f_{3,\eta}$ >0.961 91,令 $\eta_2=0_{\circ}$

$$f_{3,\eta_2} = \frac{L_{xy} \{L\}}{\sqrt{L_{xy} \{L\}^2}}$$
(4)

3 表面高度恢复

在分析完光照参数估计后,可以求取物体表面的 梯度。SFS算法的核心是牛顿迭代法,而三维表面形 状可看成一组由非线性方程组组成的曲线集合,因而 在求解f(X)=0时,通常采用后向有限差分计算待求物 体表面梯度(h,v)的近似偏导数,并离散化之前求出 的辐照方程式^[11],见式(5),那么辐照方程则变形为式 (6),对于一幅给定的分辨率为r×r灰度图像,这样就 存在有r²个线性方程组。利用牛顿迭代公式,即逐次 超松驰迭代法(Successive Over Relaxation)对方程组进 行求解,得到像素点的三维表面高度值^[12]。牛顿迭代 公式见式(7)-(8)。

$$h = \frac{\partial z}{\partial x} = z_{i,j} - z_{i,j-1} , v = \frac{\partial z}{\partial y} = z_{i,j} - z_{i-1,j}$$
(5)

$$0 = f(L_{i,j}, z_{i,j}, z_{i,j-1}, z_{i-1,j}) = L_{i,j} - R(z_{i,j} - z_{i,j-1} - z_{i-1,j})$$
(6)

$$z_{x,y}^{N} = z_{x,y}^{N-1} - \frac{f(z_{x,y}^{N-1})}{\frac{\partial f}{\partial z_{xy}}(z_{x,y}^{N-1})}$$
(7)

$$\frac{\partial f}{\partial z_{xy}} z_{x,y}^{N-1} = \frac{(h+v)(hh_0 + vv_0 + 1)}{\sqrt{h_0^2 + v_0^2 + 1} \sqrt{h^2 + v^2 + 1}} - \frac{h_0 + v_0}{\sqrt{h_0^2 + v_0^2 + 1} \sqrt{h^2 + v^2 + 1}}$$
(8)

4 网点立体还原

在光照参数确定的条件下,要想重建出物体的

三维信息,首先要提取不同形状网点二维的图像灰 度信息。胶印样张利用经过方正 RIP 加过网后,经由 海德堡 CTP 版材、Heidelberg 四色胶印机输出。裁下 样张中的网点试样,用载玻片夹好并将其水平放置 于显微镜的载物台上,纸面二维图像经光源均匀照 射,在光学显微放大镜头下形成放大图像,并在CCD 原件的作用下拍摄形成二维矩阵信息,见图1。CCD 光学元器件将各点的灰度转换成电信号依次输出, 再经过视频采集卡,将模拟的视频图像信号在计算 机中形成图像[13-14]。对图像以中值滤波的方式去除 噪声之后,利用图像分析软件得到数值化的网点二维 灰度数据,为形貌恢复提供依据,不同形状网点的二 维图像见图3。实验具体步骤:不同形状网点试样--显微图像采集一中值滤波处理一网点二维形态提 取-SFS立体形貌恢复-网点微观模型建立-网点微 观形态分析。



图3 不同形状网点二维平面

Fig.3 Two-dimensional plane images of dots of different shapes

通过加入光照参数估计的SFS形貌恢复算法,对 图像中的起始点开始,逐行、逐列计算网点二维数据 中每一像素点的高度值z,调用 Matlab 里的 fopen 函数 直接进行数据读取,从而实现物体的三维表面形状恢 复。具体流程见图4,输入所需参数如图像像素的亮 度值与迭代次数,而输出参数则为三维表面形状恢复 之后物体的高度。最后得出次偏角估计参数为 0.9068,倾角估计参数为0。

为了验证算法在提取印刷网点立体形态的微观 应用性,利用经过光照参数估计的SFS算法对不同标 准样张上不同形状的网点进行三维形貌恢复,恢复结



图4 改进SFS形貌恢复算法流程



果见图5。



图5 标准样张2网点立体图 Fig.5 3D dots of different shapes in standard proof

5 精度分析

采用半径为0.175 mm的精密微型球体作为分析 SFS在微观形貌恢复中精度分析的主要参考物质。可 通过显微成像系统获取微型球体所对应数字图像中 每一像素点的灰度值,由于精密微型球体具有标准结 构,在读取的过程中可以直接提取出这些数据,不会 受到其他外界因素的影响,因此可以作为模型精度评 价的依据。具体过程为:利用原SFS算法及改进后的 SFS算法对精密球体进行立体恢复后,从恢复结果的 第一个截面开始,对网点所在的200个截面逐次扫描, 按列寻找每个截面上第一个和最后一个高度非零点, 这些边缘非零的像素点的组合就是物体的轮廓;根据 标准图中圆的直径和圆的位置就可以计算出每个截 面上对应点的真实高度尺寸;将截面上各点的恢复数 据与真实数据进行比较,从而比较两种形貌恢复算法 的误差情况。

原SFS算法和改进后SFS算法的不同范围内的平 均误差截面数及所占百分比情况见表1,由表1可知原 算法的误差基本集中在3~4 μm阶段,而改进算法的误 差基本集中在2~3 μm阶段,其中原算法4~5 μm误差 段的截面个数明显多于改进后算法。以20个截面为步 长,各范围内的误差情况见图6。由图6可以看出,改 进算法在每个截面范围上的误差均小于原有SFS算法; 经过计算原有算法的所有截面的平均误差占标准球体 平均周长的2.57%,而改进算法相应的比值为1.93%, 因此改进的SFS算法能够有效提高微观网点立体模型 的构建精度,可以作为网点立体还原的有效工具。



平均	原算法		改进算法	
误差/μm	截面数	误差率/%	截面数	误差率/%
<i>a</i> <1	2	1.0	4	2.0
$1 \leq a < 2$	27	13.5	35	17.5
2≤ <i>a</i> <3	43	21.5	62	31.0
3≤ <i>a</i> <4	69	34.5	56	28.0
4≤ <i>a</i> <5	33	16.5	18	9.0
5≤ <i>a</i> <6	17	8.5	20	10.0
$a \ge 7$	9	4.5	5	2.5



图6 原有与改进SFS算法误差比较

Fig.6 The error comparison bewteen original and improved SFS algorithms

6 结语

从微观角度出发,运用改进的 SFS 方法对光照参

数进行八邻域估计,得到点光源的偏角和倾角,使其 能够有效提高算法精度并应用于微观领域。实验完 成了对方形、圆形、菱形、同心圆网点微观立体模型的 构建。结果表明:经过计算原有算法所有截面的平均 误差占标准球体平均周长的2.57%,而改进算法相应 的比值为1.93%,改进的SFS算法可以从微观角度显 著提高表征和测量网点微观相关指标的准确性,从而 从源头上有效地检测网点复制质量,为印刷品质量控 制与评价提供新的方法。

参考文献:

Eatestestestelle

[1] 张旭亮. 网点微观结构解析[J]. 测绘通报, 2007(12): 21-23

ZHANG Xu-liang.Aanlysis of Dot Microstructure[J].Bulletin of Surveying and Mappingk, 2007(12):21-23.

- [2] CHU F Q, LI C Y. Study on the Effect of Paper Properties on the Dot Reproduction Attributes Based on the Grey Relational [J]. J Appl Mechanics and Materials, 2013, 262: 297-301.
- [3] 俞鸿波,赵荣椿,王兵,等.单幅图像三维表面重建中的共 轭梯度算法[J]. 计算机工程与应用, 2003, 35: 24-25. YU Hong-bo, ZHAO Rong-chun, WANG Bing, et al. Analysis and Realization of the Gradient Algorithms of SFS[J]. Computer Engineering and Applications, 2003, 35:24-25.
- [4] 李杨军.基于单幅数字图像灰度三维物体形状表面恢复的 研究[D]. 南昌:华东交通大学大学,2009. LI Yang-jun. Research on 3D Object Surface's Shape Recovery Based on a Single Image's Gray-scale[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2009.
- [5] JOSEPH J A, GIFFIN P, NORMAN R. Statistical Approach to Shape from Shading: Reconstruction of 3D Face Surfaces from Single 2D Images[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1998, 67(3):231-243.
- [6] ROBLES K A, HANCOCK E R. A Graph-spectral Approach to Shape-from-shading[C]// Proceedings International Con-

ference on Pattern Recognition, 2004.

- [7] BLINN J, JAMES F, MARTIN E. Texture and Reflection in Computer Generated Images[C]// International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Los Angeles, 1976.
- [8] 蔡钦涛. 基于图像的三维重建技术研究[D]. 杭州:浙江大 学,2004.

CAI Qin-tao. Research of Image Based 3D Reconstruction[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.

- LEE M. 3D Shape Reconstruction of Hybrid Reflectance [9] Using LMS Algorithm[J]. International Journal of Pattern Recognition & Artificial Intelligence, 2001, 15(4): 723-734.
- [10] PFISTER H, ZWICKER M, BAAR J. Surfels: Surface Elements as Rendering Primitives[C]// International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Los Angeles, 2000.
- [11] SHASHUA A, NAVAB N. Relative Affine Structure: Canonical Model for 3D from 2D Geometry and Applications[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(9): 873-883.
- [12] ZENG G, MATSUSHITA Y, QUAN L, et al. Interactive Shape from Shading[C]// Computer Society Conference on IEEE, 2005:343-350.
- [13] CAPRARI R. Duplicate Document Detection by Template Matching[J]. Image and Vision Computing, 2000(18):633-643.
- [14] LUO Z, ZHANG Z. Automatic Color Printing Inspection by Image Processing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 139(2): 373-378.
- [15] 王琪. 基于网点结构形态的图像信息印刷复制研究[D]. 南 京:南京林业大学,2013. WANG Qi. Research on the Quality of Image Replication Based on Dot Microscopic Structure[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.



