

文章编号: 1001-0920(2004)10-1125-04

## 视觉匀度分析的改进梯度指数法及其应用

常发亮, 王 平, 乔谊正, 季鸿雁

(山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

**摘 要:** 以纸张为研究对象, 利用计算机视觉方法, 在分析了标准匀度检测方法的基础上, 采用类金字塔结构方差给出了改进的梯度指数纹理分析算法, 它既体现了微观匀度特性, 又体现了宏观匀度特性。实验结果表明, 该方法对于分析纸张匀度是可行的, 并具有较高的鲁棒性能。

**关键词:** 计算机视觉; 匀度分析; 纹理分析; 梯度指数

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A

### Advanced gradient index analysis method for the evenness based on computer vision and its application

CHANG Fa-liang, WANG Ping, QIAO Yi-zheng, JI Hong-yan

(College of Control Science and Engineering, Shandong University, Ji nan 250061, China Correspondent: CHANG Fa-liang, E-mail: flchang@sdu.edu.cn)

**Abstract:** An advanced gradient index texture analysis algorithm based on computer vision methods is proposed with paper as the research object, which uses pyramid-like structure squared variance based on the standard evenness detecting method. This method has both micro evenness characteristics and the macro ones. Experimental results indicate that the method is feasible for analyzing paper evenness and is of higher robustness.

**Key words:** computer vision; evenness analysis; texture analysis; gradient index

## 1 引 言

纸张匀度是指纸张中纤维及填料、胶体等固体组分的分布均匀程度, 包括纤维的分散程度、纤维的空间定向程度和方式, 以及固体组分的靠紧程度。匀度实质上是纸张的一种物理性能, 主要表现在纸幅上定量的变化情况。

纸张匀度的检测习惯上利用纸的透光均匀程度来确定。匀度较好的纸张, 其单根纤维及其他固体组分均匀地分布于纸中, 所以透光十分均匀, 呈磨砂玻璃状的图像; 匀度不良的纸张, 其纤维分布呈团状组织或云状组织, 纤维组织脱节, 存在条状浆溜以及絮聚物、网印、填料等, 使得各处的透光强度有所差

别<sup>[1,2]</sup>。

纹理分析方法大致上可分为统计方法和结构方法两类。统计方法用于分析象木纹、沙地、草坪等纹理细而不规则的物体; 结构方法则用于分析象布料的印刷图案等一类纹理基元以及排列较规则的图像<sup>[3,4]</sup>。纸张中纤维分布具有一定的随机性, 呈不规则形状, 且大小不一。为此, 本文提出一种纸张图像纹理特征提取的统计方法——改进的梯度指数法。

## 2 标准匀度检测方法及其缺陷

### 2.1 实验系统及图像预处理

纸张匀度分析的实验系统如图1所示。系统采用灯箱背投照明方式, 所采集的图像质量较好, 但图

收稿日期: 2003-11-03; 修回日期: 2004-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60104009); 山东省自然科学基金资助项目(Y2001G06)。

作者简介: 常发亮(1965—), 男, 山东寿光人, 教授, 博士生, 从事模式识别、机器视觉等研究; 乔谊正(1942—), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 从事模式识别、智能控制等研究。



图 1 纸张匀度分析实验系统

像的对比度仍然不够 因此在进行匀度分析之前, 首先需要进行图像的预处理

一般说, 自然图像的灰度级直方图在低值灰度区域数目较大, 大部分像素的灰度级低于平均灰度级, 图像上隐含在较暗区域的细节往往看不清 本文通过构造灰度级变换, 改造图像的直方图, 利用直方图均衡方法使变换后图像的灰度达到较高的对比度要求<sup>[5]</sup>.

对数字图像的灰度级  $r$  取离散值  $r_k (k = 0, 1, \dots, L - 1)$ , 其中  $L$  为灰度等级 设  $n$  为图像的像素总数,  $n_k$  为第  $k$  个灰度级  $r_k$  出现的频数 (即像素数目), 则第  $k$  个灰度级出现的概率为

$$P_r(r_k) = n_k/n, \quad (1)$$

其中  $0 \leq r_k \leq 1, k = 0, 1, \dots, L - 1$  灰度变换的离散形式为

$$S_k = T(r_k) = \frac{\sum_{j=0}^k n_j}{n} = \sum_{j=0}^k P_r(r_j). \quad (2)$$

在上述变换下, 数字图像的直方图将成为均匀分布形状 可根据原图像的直方图统计量求得均衡后各像素的灰度级变换值

### 2.2 标准匀度检测方法及其缺陷

国际上检测纸张常用的方法是标准匀度检测法 该方法将纸张局部定量的标准方差与局部定量的均值之比作为匀度指数, 称为标准匀度指数, 记为  $F_N$ . 设纸张的局部定量图像为  $f(x, y)$ , 则有:

局部均值

$$\bar{f} = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y), \quad (3)$$

标准方差

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) - \bar{f}]^2}, \quad (4)$$

标准匀度指数

$$F_N = \sigma/\bar{f} = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) / \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) - \bar{f}]^2}. \quad (5)$$

均方差反映了局部定量与局部平均定量的偏离程度 均方差小说明纸张定量比较均匀, 匀度较

好; 均方差大则说明纸张定量偏差较大, 匀度较差

对于具有完全相同的均方差和纹理空间分布的纸张, 虽然均方差相同, 但用眼观察则会发现, 平均定量小的纸张, 其匀度较差; 平均定量较大的纸张, 其匀度较好 因此, 标准匀度指数  $F_N$  既考虑到局部定量的偏离程度, 又考虑到纸张平均定量对匀度的影响, 较全面地反映了纸张的匀度信息

这种方法简单、快速, 缺点是具有不同匀度的纸张可能具有相同的匀度指数

### 3 纸张匀度分析的梯度指数法

#### 3.1 平均梯度方法

标准匀度指数从一定程度上反映了纸张匀度的优劣, 但均方差只是对定量分散度的一种整体统计, 缺乏对定量变化率的描述 在纸张匀度分析中, 定量变化率是一个重要的性能指标 从纸张的局部看, 定量变化率小的纸张要比定量变化率大的匀度好些<sup>[1,6]</sup>.

设纸张定量图像为  $f(x, y)$ , 在  $(x, y)$  点处的梯度  $G[f(x, y)]$  是一个矢量

$$\bar{G}[f(x, y)] = \begin{bmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \end{bmatrix}. \quad (6)$$

其方向是图像  $f(x, y)$  在该点处变化率最大的方向, 其长度等于图像  $f(x, y)$  在该点处的最大变化率, 即

$$G[f(x, y)] = [(\partial/\partial x)^2 + (\partial/\partial y)^2]^{1/2}. \quad (7)$$

对于数字图像, 可用差分代替微分. 常用的差分算法有两种: 一种是典型的差分算法, 可表示为

$$G[f(x, y)] = \{ [f(x, y) - f(x + 1, y)]^2 + [f(x, y) - f(x, y + 1)]^2 \}^{1/2}; \quad (8)$$

另一种称为 Robert 梯度的差分算法, 定义为

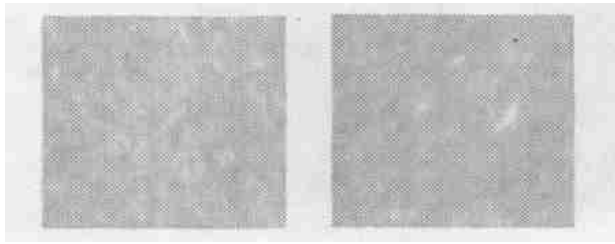
$$G[f(x, y)] = \{ [f(x, y) - f(x + 1, y + 1)]^2 + [f(x + 1, y) - f(x, y + 1)]^2 \}^{1/2}. \quad (9)$$

整幅图像的平均梯度定义为

$$\bar{G} = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} G[f(x, y)] \quad (10)$$

本文采用求取平均梯度的方法对纸张定量图进行分析 平均梯度是对图像中各像素点的梯度值的数学统计, 该方法从一定程度上反映了局部定量的变化情况 平均梯度越小, 说明纸张局部定量变化越小, 纸页的匀度也越好

采用常见的两种差分算法对纸张定量图进行梯度分析比较结果如图 2 所示 其中:  $t_1$  为用典型的差分算子求取的平均梯度,  $t_2$  为用 Robert 算子求取



(a)  $t_1 = 7.06, t_2 = 6.58$  (b)  $t_1 = 7.80, t_2 = 7.02$

图 2 平均梯度比较

的平均梯度。从比较结果看出, 采用 Robert 梯度差分算法效果较好, 对匀度比较敏感, 不同匀度的纸张求得的梯度数值相差较大。

该方法从一个侧面反映了纸张局部定量的微弱变化, 但缺乏对整体定量变化的描述。由理论分析可知, 当图像在灰度小区域内变化较慢或较少, 而存在大面积不匀的情况时, 用上述方法求得的平均梯度可能较小, 与整体灰度变化较慢或较小的图像相比, 平均梯度可能没有太大的差别。针对这一现象, 本文给出一种改进的方法。

### 3.2 改进的梯度指数算法

通过观察纸张定量可以发现, 纸张中的较小纤维絮团远大于一个像素。如果分析的是纤维絮团的分布情况, 则应注意图像灰度小区域内变化较小而存在大面积不均匀时的指数变化, 将描述微观结构的指标与分布指标结合起来。改进后的梯度指数  $F_{GN}$  为

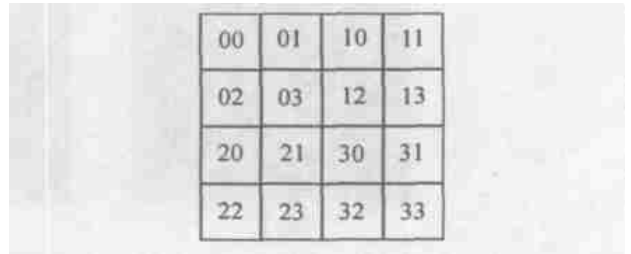
$$F_{GN} = \alpha \bar{G} + \sum_{i=1}^q \beta D_i \quad (11)$$

其中:  $\bar{G}$  为平均梯度, 见式(10);  $\alpha \in [0, 1], \beta_i \in [0, 1]$  为权系数, 其值与所关心的是微观结构还是宏观结构有关;  $q$  (此处取值为 6) 为类金字塔结构的层数;  $D_i$  为类金字塔各层图像的方差, 它不仅反映了纸张中絮团的大小, 而且反映了絮团的空间分布情况。下面说明其计算方法。

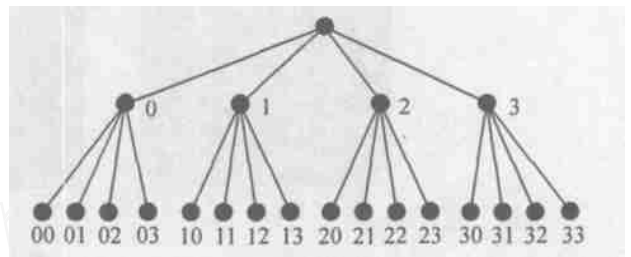
金字塔数据结构类似于四分树, 是在图像分析中广泛应用的一种结构, 它适合于图像尺寸为  $2^N \times 2^N$  的情况。在金字塔的最低层 (即四分树的终止节点) 是原始图像, 尺寸为  $2^N \times 2^N$ 。在上面一层的图像数据中, 每一像素值是该层图像数据相邻四点的平均值。在金字塔的上层, 图像的尺寸小, 分辨率低, 所含信息也更具概括性, 最顶层只有一点<sup>[3, 7]</sup>。

金字塔数据结构可用四分树来表示,  $4 \times 4$  图像与其相应四分树如图 3 所示。

本文采用的是一种类金字塔数据结构, 其最底



(a)  $4 \times 4$  图像



(b) 相应的四分树

图 3 金字塔数据四分树

层 (即四分树的终止节点) 不是原始图像, 而是将原始图像分成  $2^6 \times 2^6$  个小块后所得的图像, 各像素点的灰度值为各小块内灰度的均值。

设纸张定量图像为  $\{f(x, y), x, y = 0, 1, \dots, N-1\}$ , 依次将图像分割为  $2^1 \times 2^1, 2^2 \times 2^2, 2^3 \times 2^3, 2^4 \times 2^4, 2^5 \times 2^5, 2^6 \times 2^6$  不同级别的子块, 记为  $f_i(m, n)$ , 其中:  $i = 1 \sim q (q = 6)$  为分割级别;  $m$  和  $n$  为当前块在该层的位置坐标;  $f_i(m, n)$  为第  $i$  层图像的像点灰度值, 即

$$f_i(m, n) = \frac{1}{L^2} \sum_{x=mL}^{(m+1)L-1} \sum_{y=nL}^{(n+1)L-1} f(x, y) \quad (12)$$

式中  $L = N/2^i$  表示各层子块的大小。整幅图像的灰度均值为

$$\bar{f} = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \quad (13)$$

各层图像的方差为

$$D_i = \frac{1}{q} \sum_{m=0}^{q-1} \sum_{n=0}^{q-1} [\bar{f} - f_i(m, n)]^2 \quad (14)$$

$D_i$  反映了不同级别上纸张定量的分散度。若  $D_1$  较大, 则说明一级子块  $f_1(m, n)$  间的差异较大, 即该纸样存在大面积的絮团分布不匀情况。级别  $q$  越大, 即图像分割得越细, 则子块越小。

该方法可从整体上对纸张的匀度进行评定, 克服了平均梯度法的微观性。对于平均梯度相差不多的纸张, 如果均方差较大, 即图像区域间灰度差值较大, 则改进后求取的梯度指数  $F_{GN}$  也较大; 反之, 图像均方差较小, 即区域间灰度差值较小, 则梯度指数  $F_{GN}$  也较小。

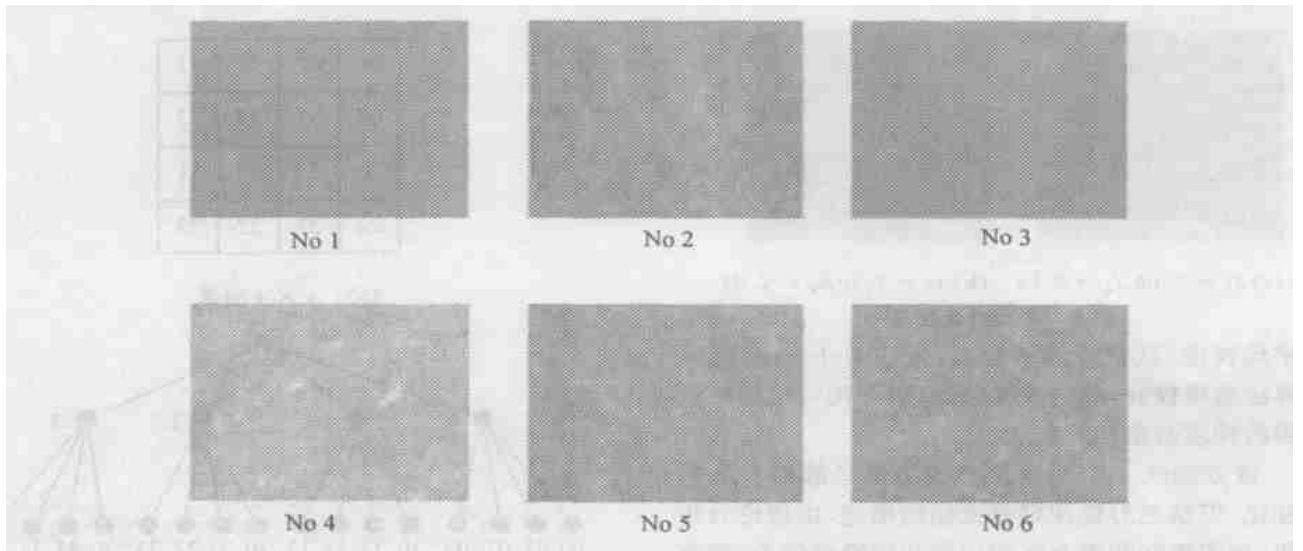


图 4 纸张样本

4 梯度指数分析法的可行性对比与验证

采用 Sobel 算子梯度分析图 4 中的纸样, 分析结果如表 1 所示

表 1 平均梯度

No	1	2	3	4	5	6
$\bar{G}$	8.175	9.138	7.294	7.887	7.123	9.745

由目测可以看出, No1, No2, No3 纸样的匀度较好, No4, No5, No6 纸样的匀度较差. 但从表 1 发现, 匀度较好的纸页平均梯度反而较大, 实验结果与预期结果出现了较大偏差. 如匀度较差的 No4 和 No5 两个纸样, 它们的平均梯度比匀度较好的 No1 和 No2 还要小.

经仔细观察发现, No4 和 No5 这两个纸样有一个共同的特点, 即纸页定量图灰度的方差均较大. 由理论分析可知, 如果有这样两幅图像: 一幅图像整体上灰度变化较大, 而局部小区域内灰度变化较慢或较小; 另一幅图像从整体和局部上看, 灰度变化均较适中. 那么它们的平均梯度可能出现上面的情况. 主要原因是梯度仅反映局部定量的微弱变化, 无法反映全局的定量变化.

用改进算法对图 4 中纸样提取匀度信息, 实验结果如表 2 所示. 该算法检测结果与目测结果的比较如表 3 所示, 匀度性能从左至右依次降低.

表 2 改进梯度指数法实验结果

No	1	2	3	4	5	6
$F_{GN}$	1.423	1.495	1.279	1.691	1.540	1.625

表 3 匀度排序结果

目测排序	No1	No3	No2	No5	No6	No4
$F_{GN}$ 排序	No3	No1	No2	No5	No6	No4

从表 3 可以看出, 改进后梯度算法的检测效果比较理想, 与目测结果基本相同. 该算法简单, 速度快, 实时性强.

5 改进梯度指数法的鲁棒性实验分析

为检验改进梯度分析法的稳定性, 本文对同一纸样在不同条件下 (如光线、亮度、倾斜度、对比度等) 进行实验. 采集 20 次, 计算每次采集图像的  $F_{GN}$ , 所得结果如表 4 所示.

由概率论知识可知, 标准差能衡量一组变量值与其平均值的偏离程度, 可表示为

$$S = \sqrt{(x - \bar{x})^2 / (n - 1)}. \quad (15)$$

经计算, 表 4 中数值的均值  $\bar{x} = 1.3455$ , 标准差  $S = 0.465$ , 标准差是均值的 3.46%. 这说明数据偏离程度较小, 算法稳定性较好, 受外界环境的影响较小.

表 4 同一纸张的 20 次实验结果

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F_{GN}$	1.423	1.420	1.370	1.369	1.308	1.392	1.381	1.283	1.297	1.367
No	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$F_{GN}$	1.340	1.386	1.279	1.295	1.287	1.280	1.336	1.366	1.341	1.390

(下转第 1132 页)

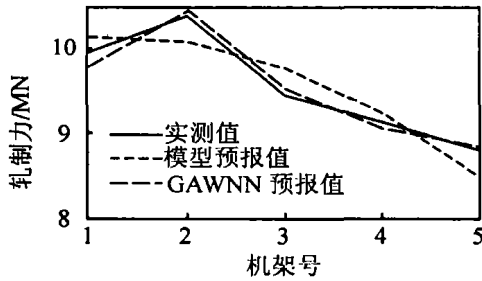


图3 实测值、模型预报值和 GAWNN 预报值结果比较  
4 个机架, 主要原因是热轧钢卷(来料)带来的扰动(包括厚度波动和硬度波动)对第1 机架轧制力的影响较大, 所以预报精度较低

## 5 结 论

本文提出一种适合于高维输入的小波神经网络建模方法, 并应用于冷轧轧制压力预报。该模型具有很高的学习精度和良好的泛化能力, 其计算精度优于原轧制力模型。在遗传算法中引入梯度下降算子, 结合两种方法的长处, 同时对WNN 网络结构和网络参数进行优化。该算法既有较快的收敛性, 又能以

较大的概率得到全局极值

## 参考文献(References):

- [1] Zhang Q, Benvenise A. Wavelet network [J]. *IEEE Trans on Neural Network*, 1992, 3(6): 889-898
- [2] Delyon B, Judilsky A, Benvenise A. A accuracy analysis for wavelet approximations[J]. *IEEE Trans on Neural Network*, 1995, 6(2): 332-348
- [3] Zhang J, Walter G G, Miao Y B, et al. Wavelet neural networks for function learning[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1995, 43(6): 1485-1496
- [4] 孙登月, 朱光明, 杜凤山. 冷连轧机轧制力人工神经网络预报[J]. *冶金设备*, 2001, 6(3): 1-3  
(Sun Dengyue, Zhu Guangming, Du Fengshan. Neural network predict for cold continuous rolling force [J]. *Metallurgical Equipment*, 2001, 6(3): 1-3)
- [5] 赵明旺. 基于遗传算法和最速下降法的函数优化混合数值算法[J]. *系统工程理论与实践*, 1997, 17(7): 59-64  
(Zhao Mingwang. A hybrid numerical algorithm for function optimization based on genetic algorithm and steepest decent algorithm [J]. *Systems Engineering - Theory and Practice*, 1997, 17(7): 59-64)

(上接第 1128 页)

## 6 结 论

本文采用机器视觉来分析纸张的匀度特性, 给出了匀度分析的实验系统结构, 分析了标准匀度检测方法的缺陷, 提出一种改进的梯度指数纹理分析算法, 并对纸张匀度进行实验分析。实验结果表明, 该方法对于分析纸张匀度是可行性的, 并具有较高的鲁棒性

## 参考文献(References):

- [1] 阎东波, 刘焕彬. 纸页匀度的一种表征方法[J]. *中国造纸*, 1997, (6): 6-11.  
(Dongpo Yan, Huanbin Liu. A expressing method of the paper evenness[J]. *China Pulp and Paper*, 1997, (6): 6-11.)
- [2] 夏丽峰, 马忻. 纸和纸板物理特性及其试验方法[M]. 北

京: 轻工业出版社, 1996 96-104

- [3] 贾云得. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2000 53-56
- [4] Zhang Jianguo, Tan Tieniu. Brief review of invariant texture analysis methods [J]. *Pattern Recognition*, 2003, 36(3): 657-664
- [5] Kenneth R Castleman. *Digital Image Processing* [M]. Texas: Prentice-Hall Int Inc, 1996 71-75.
- [6] Jean Philippe Bernie, Murray Douglas W J. Local grammage distribution and formation of paper by light transmission image analysis[J]. *Tappi J*, 1999, 79(1): 23-31.
- [7] Chuns Lu, Pou Chung. Unsupervised texture segmentation via wavelet transform [J]. *Pattern Recognition*, 1997, 30(5): 729-742