

# 基于图像分析的纤维直径和曲率的测量方法

任帅杰<sup>1),2)</sup> 张文生<sup>1)</sup> 何源<sup>1)</sup> 王颖

<sup>1)</sup>(中国科学院自动化研究所,北京 100080) <sup>2)</sup>(中国科学院研究生院计算与通信工程学院,北京 100080)

**摘要** 纤维直径(细度)和曲率的测量在羊毛产业和纺织工业中具有举足轻重的作用。提出了一种基于图像分析的全自动测量方法,该方法首先对采集的图像进行图像增强,利用 Canny 边缘检测提取纤维边缘,根据纤维图像的特点用聚类的方法对增强后图像进行二值化,并对二值化图像进行一系列后处理,然后提取出纤维的骨架,进而通过距离变换和特定的搜索算法计算骨架上每个点对应处的纤维直径和曲率。实验结果表明,该方法与基于直线拟合的方法相比,不仅计算速度快,而且绕开了很多可能产生误差的环节,测量准确率较高。

**关键词** 直径 曲率 骨架 距离变换

中图法分类号:TP391.41 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)06-1153-06

## Measuring Diameter and Curvature of Fibers Based on Image Analysis

REN Shuai-jie<sup>1),2)</sup>, ZHANG Wen-sheng<sup>1)</sup>, HE Yuan<sup>1)</sup>, WANG Ying

<sup>1)</sup>(Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

<sup>2)</sup>(College of Computing & Communication Engineering, Graduate university of the Chinese Academy of Science, Beijing 100080)

**Abstract** Measurement of the diameter and curvature of fibers plays a very important role in wool and textile industry. In this paper, an automatic measurement method based on image analysis is presented. In this method, the image processing and analysis is fully used. Firstly, this method enhances the captured images. Secondly, it uses canny operator to detect the edges of the fibers. And then, it acquires the binary images by using clustering. It does post-processing operation to the binary images and extracts the skeletons of the fibers. Finally, it computes the value of diameter by Euclid-distance-transformation, and calculates the value of curvature. As experiments demonstrate, this method is not only more quickly than the method based on line fitting, but also generates more accurate results than the method based on line fitting because we have avoided many steps which may introduce errors.

**Key words** diameter, curvature, skeleton, distance-transformation

## 1 引言

直径(细度)<sup>[1]</sup>和曲率是评价羊毛和纺织品质量的重要标准,测量的自动化程度和结果的准确度直接关系着检测的效率和可信度。

以往检测人员普遍采用显微镜投影仪法<sup>[2]</sup>,该

方法耗时耗力,效率非常低,由于是人工参与,所以存在主观误差。激光法<sup>[3]</sup>能够得到很好的测量效果,但由于其机械加工精度高,对环境要求高且测量范围窄也不能被很好地推广。自从1970年世界上第1台计算机辅助的羊毛直径测定仪<sup>[4]</sup>诞生后,以图像处理和分析为基础的测量方法得到了广泛地应用和发展,并取得了不错的效果。目前广泛采用的

**基金项目:**国家基础研究发展计划973项目(2004CB318103);国家自然科学基金项目(60033020);中国科学院海外杰出人才研究计划项目(06S3011S01)

**收稿日期:**2006-12-11; **改回日期:**2007-01-24

**第一作者简介:**任帅杰(1982~),男。现为中国科学院自动化所通信与信息系统硕士研究生。主要研究方向为图像处理中的微观特征分析和纹理分析。E-mail:shuaijieren@yahoo.com.cn

是分段直线拟合的方法<sup>[5,6]</sup>,该方法采用直线拟合纤维的边缘线,通过几何的方法计算出直径及其曲率,但是,每次只能处理含一根纤维的图像。该方法不但计算量比较大,而且引入了额外误差,图像包含纤维根数越多,误差就越明显。

本文提出的测量方法利用距离变换和特定的搜索算法保证了测量直径和曲率的准确性,绕开了直线拟合的步骤。与分段直线拟合的方法相比,不但提高了计算速度,还克服了直线拟合过程中引入的误差。

## 2 图像的预处理

### 2.1 边缘检测

输入图像一般为从显微镜得到的灰度图像(如图 1 所示)。首先对图像作对比度增强,然后提取图像中纤维的边缘。在边缘检测中最大的困难是伪边缘和边缘定位问题,传统的微分算子法,比如 sobel 算子,对噪声比较敏感,而且检测出的边缘与真实边缘相比移位比较严重。本文采用 Canny 检测方法<sup>[7]</sup>进行边缘检测。Canny 算子是基于 3 个边缘检测准则而推导出来的算法。

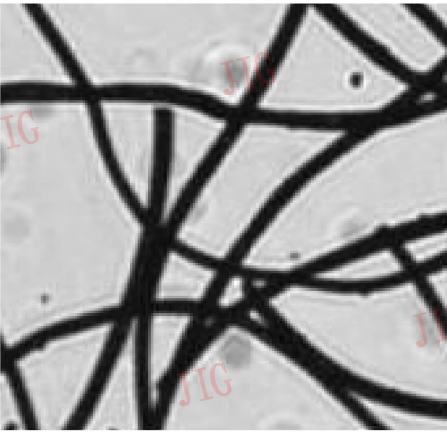


图 1 原始显微图像

Fig. 1 The original micrograph

这 3 个准则是:

(1) 信噪比准则:漏检真实边缘的概率和误检非边缘的概率尽可能小。

(2) 最优定位准则:检测到的边缘点的位置离实际边缘点的位置最近,或者由噪声引起检测出的边缘偏离物体真实边缘的程度最小。

(3) 检测点与边缘点一一对应。

根据以上准则,Canny 算子可以近似表示为具

有平滑功能的一阶微分算子:

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial x} = kx \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \\ \frac{\partial G}{\partial y} = ky \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $k = \frac{-1}{2\pi\sigma^4}$ , $G$  代表 1 幅图像, $\sigma$  是图像灰度值的标准差。

Canny 方法采用双阈值检测边缘,因此,Canny 算子的抗噪声性能和边缘定位精度都很高。根据实验结果,取  $\sigma = 2$  效果比较好,低阈值和高阈值根据具体图像选取。

### 2.2 图像二值化

提取出纤维图像的边缘后,将纤维图像转换为二值图像(如图 2 所示)。本文借鉴机器学习理论提出了一种基于高斯分布的聚类算法对图像进行二值化,理论上可以使二值化误差尽量小。该算法假定图像灰度直方图分布是前景、背景两个高斯分布的混合,然后用 2-均值聚类法把所有像素聚成两类,分别对应两个高斯分布,取这两个高斯分布均值的平均值作为二值化的阈值即可。

由于在二值化过程中可能形成的伪前景使纤维图像比实际要粗,因此,要对纤维图像的边缘图像取反,用取反后的图像和纤维的二值图像做与操作,然后再对结果图像进行后处理,包括填补空洞和去除小的分支。

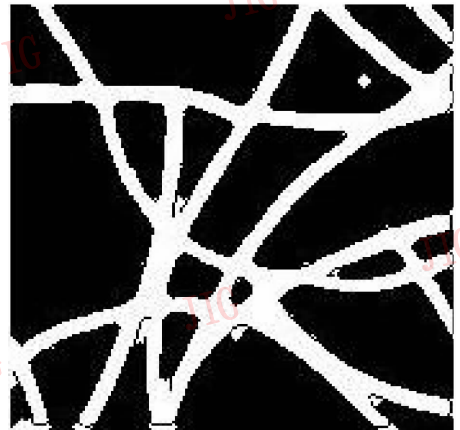


图 2 二值图像

Fig. 2 The binary image

### 2.3 纤维的骨架提取

纤维的骨架是指每根纤维的中线,纤维的骨架是接下来计算直径和曲率的基础。

已知集合  $A$ , 对于  $A$  的骨架  $S(A)$  可以表示为如下点的集合:

$$S(A) = \bigcup_{k=0}^K S_k(A) \quad (2)$$

$$S_k(A) = (A \ominus k B) - (A \ominus (k+1) B) \quad (3)$$

这里  $B$  是结构元素,  $(A \ominus k B)$  表示对  $A$  做  $k$  次腐蚀

$$(A \ominus k B) = (\dots (A \ominus B) \ominus B) \ominus \dots \ominus B \quad (4)$$

第  $K$  次是  $A$  被腐蚀为空集合前进行最后一次迭代

$$K = \max \{ k \mid (A \ominus k B) \neq \emptyset \} \quad (5)$$

式中,  $K$  是腐蚀迭代的次数,  $k = 0, 1, \dots, K$ 。

在提取纤维骨架的算法中, 假设前景点像素值为 1, 背景点像素值为 0。这里边界点是指任何为 1 且其 8 邻域中至少有一个 0 的点。边界点  $P_1$  的 8 邻域如下表

表 1 边界点  $p_1$  的 8 邻域

Tab. 1 8-neighbor of edge point  $p_1$

$p_9$	$p_2$	$p_3$
$p_8$	$p_1$	$p_4$
$p_7$	$p_6$	$p_5$

算法步骤如下:

(1) 对满足下面 4 个条件的边界点打删除标记

①  $p_1$  的 8 邻域中 1 的个数大于等于 2、小于等于 ( $\leq$ ) 6

② 按  $p_2, p_3, \dots, p_9$  顺序 0 ~ 1 的转换个数为 1

③  $p_2, p_4, p_6$  中至少一个为 0

④  $p_4, p_6, p_8$  中至少一个为 0

(2) 对满足下面 4 个条件的边界点打删除标记条件

①、②与操作(1)中的①、②相同

③  $p_2, p_4, p_8$  中至少一个为 0

④  $p_2, p_6, p_8$  中至少一个为 0

(3) 重复步骤(1)和步骤(2), 直至没有点删除, 算法终止。

提取出骨架后, 要对骨架图像进行后处理, 以找出有效的骨架点。具体操作包括去除噪声点和删除交叉区域内的骨架点, 本文根据噪声点和交叉区域骨架点的特点制定表, 用查找表的方法找出并删除交叉点和噪声点。最后得到的骨架图像如图 3 所示。

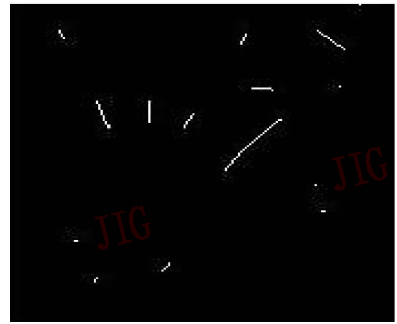


图 3 图 2 的骨架图像

Fig. 3 The image of skeletons

### 3 纤维直径计算

距离变换的概念<sup>[8]</sup>是由 Rosenfeld 和 Pfaltz 于 1966 年首次提出, 现已在很多领域中被广泛应用。距离变换是针对二值图像的一种变换, 距离变换的结果不再是二值图像, 而是 1 幅灰度图像(如图 4 所示)。图像中每一个像素点的灰度值都代表二值图像中该点的距离变换值, 即该像素点与距其最近的背景像素点之间的距离。

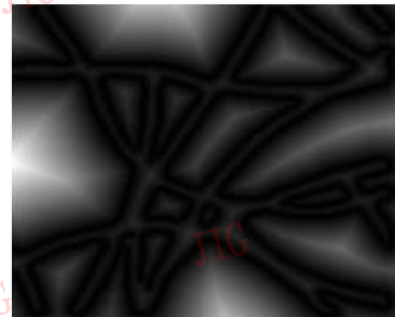
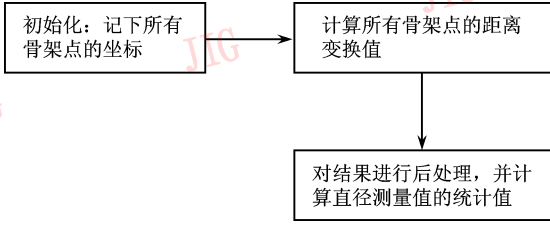


图 4 图 2 的距离变换图像

Fig. 4 The image of distance transform

采用穿行扫描的方法来实现距离变换的算法虽然简单、快捷, 但得到的不是精确的欧氏距离变换值, 而是精度较低的近似值。欧氏距离变换具有很高的计算复杂度, 当二值图像中有一半像素为背景点时, 在最坏的情况下, 其计算复杂度可以达到  $O(n^4)$ , 因此, 有很多学者都在研究高效、快速的欧氏距离变换算法<sup>[9~12]</sup>。本文根据纤维图像中纤维骨架上的点与最近的背景点之间的距离(一般都在几个像素到十几个像素的范围内这个特点), 设计了基于半径扩张的欧氏距离变换方法。

计算直径的算法原理框图如下：



计算骨架点的距离变换值的算法如下：

- (1) 初始化: skelCount 是骨架点的总数目;  $r$  为以所求骨架点为圆心的搜索范围的半径;  $i$  为已经找到距离变换值的点的个数, 其初值为  $i = 0$ ;
- (2) 若  $i < \text{skelCount}$ , 设定  $r$  的初值为 1; 否则, 算法结束;
- (3) 搜索  $r - 1 <$  与待变换骨架点的距离  $\leq r$  的圆环范围内所有像素点;
- (4) 若找到了该骨架点的距离变换值, 则记下该距离变换值, 且  $i = i + 1$ , 返回步骤 (2); 否则,  $r = r + 1$ , 返回步骤 (3)。

此方法用欧氏距离变换绕开了直线拟合运算, 同时也克服了每次计算直径时只能处理包含一根纤维的图像中的限制, 不但提高了计算和测量的速度, 也减小了测量误差。

### 4 纤维曲率测量

曲率是现在普遍使用的一种衡量纤维弯曲度的度量。在数学上, 曲率表示曲线上单位弧长的弧度变化率, 可以用单位弧段两端切线斜率的变化来衡量。曲线  $C = f(x)$  上点  $(x, y)$  处的曲率计算公式为

$$K(x, y) = \frac{|y''|}{(1 + y'^2)^{3/2}} \quad (6)$$

式中,  $y''$ 、 $y'$  是曲线  $C$  在点  $(x, y)$  处的二阶和一阶导数值。

目前曲率计算中普遍采用的两种方法是基于直线拟合<sup>[6]</sup>和基于曲线拟合<sup>[13]</sup>。这两种方法都要分段拟合直线或曲线, 因此引入了拟合计算的固有计算误差和由于拟合窗口不合适而产生的误差, 并且得到的只是曲率的近似值。

设一条离散曲线上有  $N$  个点  $P_1 P_2 \cdots P_i \cdots P_N$ , 根据连续曲线曲率的计算公式, 可以得到点  $P_i = (x_i, y_i)$  处曲率的离散计算公式:

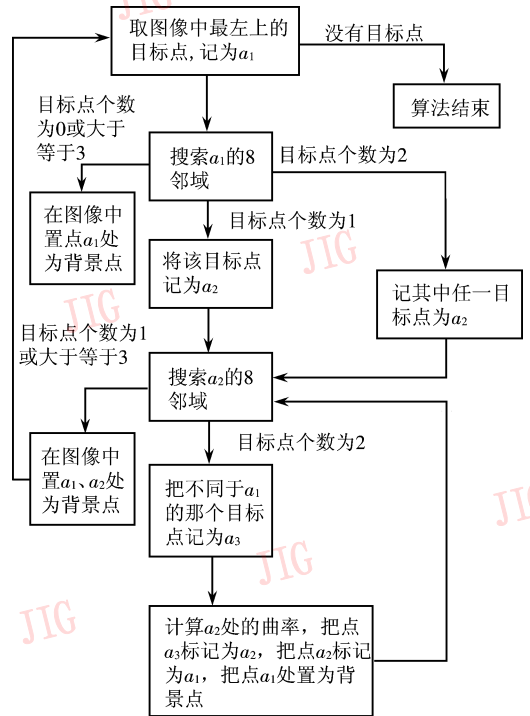
$$k_i = \frac{x'_i y''_i - y'_i x''_i}{(x_i'^2 + y_i'^2)^{3/2}} \quad (7)$$

式中,  $x'_i, x''_i$  表示点  $P_i$  处的一阶导数和二阶导数

$$\begin{aligned} x'_i &= x_{i+1} - x_{i-1} & x''_i &= x_{i+1} + x_{i-1} - 2x_i \\ y'_i &= y_{i+1} - y_{i-1} & y''_i &= y_{i+1} + y_{i-1} - 2y_i \end{aligned}$$

上式是通过逐点运算实现的, 缺点是对噪声很敏感。本文通过运用一般的滤波器去噪和特定的搜索算法相结合来实现对噪声的特殊处理。首先, 对骨架图像进行多种和多次的滤波; 然后, 在计算曲率过程中根据纤维骨架图像的特点设计了一种搜索骨架图像上有效点的算法, 剔除了大部分噪声点。该算法认为独立的骨架点或只有两个骨架点组成的线段为噪声, 若一个骨架点的 8 邻域中骨架点的数目大于等于 3, 此点同样认为是噪声点。

计算曲率的算法原理框图如下：



在结果处理中, 为了尽量降低噪声的影响, 对每个点取其前后各一个点和它本身曲率的平均值作为该点的曲率值。最后求出所有点处曲率值的统计平均值、标准差和变异系数。

### 5 实验结果和讨论

#### 5.1 实验结果

假设一个总体中包含  $n$  个观测值  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 则这个总体的标准差

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (8)$$

变异系数

$$C \cdot V = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (9)$$

$$\text{式中,平均值 } \mu = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

直线拟合法和本文提出的方法的直径测量值的统计结果如下表:

表2 直径测量结果

Tab.2 The measurement results of diameter

		单位:像素	
测量序号\方法		直线拟合	本文方法
第1次	平均值	5.865 00	5.524 60
	标准差	1.263 10	0.821 17
	变异系数	21.536%	14.864%
第2次	平均值	5.893 20	5.502 10
	标准差	1.266 23	0.822 53
	变异系数	21.486%	14.949%
第3次	平均值	5.875 30	5.512 50
	标准差	1.265 21	0.830 12
	变异系数	21.534%	15.059%

由两种方法测量结果的标准差和变异系数可知直线拟合的测量误差比较大。

在曲率的测量中,本文选用了弯曲度比较均匀的纤维图像作实验图像,这样可以从直线拟合和本文方法所得结果的标准差来判断其测量准确度。结果如下表:

表3 曲率测量结果

Tab.3 The measurement results of curvature

		单位:1/像素	
测量序号\方法		直线拟合	本文方法
第1次	平均值	0.086 2	0.079 1
	标准差	0.012 6	0.008 1
	变异系数	14.62%	10.24%
第2次	平均值	0.068 8	0.071 1
	标准差	0.009 1	0.006 9
	变异系数	13.23%	9.70%
第3次	平均值	0.061 2	0.058 9
	标准差	0.009 0	0.006 1
	变异系数	14.71%	10.36%

由表3的结果可以看出,直线拟合方法测量结果的变异系数较大,测量准确度比较低。在PC机上进行测量实验中,直线拟合方法所消耗的时间是

本文方法6~9倍,这是由于要对每个点两侧进行直线拟合造成的。

## 5.2 误差分析与处理

(1)定标误差。所谓定标误差就是校准每个像素所代表的实际距离时的测量误差。定标时的测量精度、测量状态等都会影响结果的准确度。在这里,可以采用多次测量的方法来减小误差。

(2)调焦误差。此方法用的图像一般为显微图像,所以采集图像时会引入调焦误差。因此。每次测量时都尽量保证样品与透镜距离一致,消除这种随机误差。

(3)图像分析和计算误差。这种误差包括图像二值化过程中目标像素的丢失、提取图像边缘时边缘像素点的偏差和距离变换时造成的计算误差等,可以通过对算法特定处进行编程处理来尽量减小这类误差。

## 6 结 论

本文提出测量纤维直径和曲率的方法综合利用了图像处理和分析的方法,并结合了纤维图像的特点,取得了很好的效果。改变了以前测量必须手工或半手工参与的方式,也绕开了直线拟合,避免了拟合时所引入的误差,提高了测量精度和自动化程度,同时也提高了速度。该方法能快速、高效地测量出纤维的直径等特征。

## 参考文献 (References)

- Li Yong, Xia Jiang-tao, La Zha-ti, et al. The development of test approach of wool fiber diameter. grass-feeding livestock[J]. 2005, (2):8~11. [李勇,夏江涛,拉扎提等.羊毛纤维直径测试方法的发展[J].草食家畜,2005,(2):8~11.]
- Lü Shan-mo. Summarize of the standard of foreign wool experiment (2)[J]. China Fiber Inspection, 2002, (4):40~44, (5):39~42. [吕善模.国外羊毛试验方法标准综述之二[J].中国纤检,2002, (4):40~44, (5):39~42.]
- Wang Cai-xia. Laser Interference fibre count tester and its application [J]. Journal of Textile Research, 2000, (4):51~52. [王彩霞.激光干涉式纤维细度测试仪及其应用[J].纺织学报,2000,(4):51~52.]
- Lü Shan-mo, Zhang Bao-guo. Summarize of the standard of foreign wool experiment(3)[J]. China Fiber Inspection, 2002, (6):36~39, (7):43~45. [吕善模,张保国.国外羊毛试验方法标准综述之三[J].中国纤检,2002,(6):36~39,(7):43~45.]
- Sun Bao-hai, Feng Ju-fu, Zhou Jian-ping, et al. Automatic recognition method for wool fiber image of an electron microscope[J].

- Journal of Image and Graphics, 2001, **6**(10): 979 ~ 983. [孙宝海, 封举富, 周剑平. 电镜羊绒毛图像自动识别方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2001, **6**(10): 979 ~ 983.]
- 6 Qiao Yu, Huang Xi-yue, Chai Yi, *et al.* Method of angel detection based on adaptive line fitting[J]. Journal of Chongqing University, 2003, **26**(2): 29 ~ 31. [乔宇, 黄席樾, 柴毅等. 基于自适应直线拟合的角点检测[J]. 重庆大学学报, 2003, **26**(2): 29 ~ 31.]
- 7 Canny J F A. Computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on PAMI, 1986, **8**(6): 679 ~ 698.
- 8 Rosenfeld A. Pfaltz J I. Sequential operations in digital picture processing[J]. Journal of ACM, 1966, **13**(4): 471 ~ 494.
- 9 Wang Zheng-xuan, Li Wen-hui, Pang Yun-jie. An algorithm for complete euclidean distance transformation based on contour tracing [J]. Chinese Journal of Computers, 1998, **21**(3): 217 ~ 222. [王征旋, 李文辉, 庞云阶. 基于围线追踪的完全欧氏距离变换算法[J]. 计算机学报, 1998, **21**(3): 217 ~ 222.]
- 10 Chen Ling. Optimal algorithm for complete euclidean distance transform[J]. Chinese Journal of Computers, 1995, **18**(8): 611 ~ 616. [陈峻, 完全欧几里德距离变换的最优算法[J]. 计算机学报, 1995, **18**(8): 611 ~ 616.]
- 11 Guang Wei-guang, Ma Song-de. A fast unified distance transformation algorithm[J]. Chinese Journal of Computers, 1995, **18**(8): 626 ~ 635. [管伟光, 马颂德. 统一化的快速距离变换[J]. 计算机学报, 1995, **18**(8): 626 ~ 635.]
- 12 Olivier C, Benoit M. Fast euclidean distance transformations by propagation using multiple neighbourhoods [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999, **76**(2): 163 ~ 172
- 13 Hou Xue-zhi, Yang Ping, Zhao Yun-song. Contour feature point detection algorithm of CCD image[J]. Journal of UEST of China, 2004, **33**(4): 446 ~ 448. [侯学智, 杨平, 赵云松. CCD 图像的轮廓特征点提取算法[J]. 电子科技大学学报, 2004, **33**(4): 446 ~ 448.]