

## 基于傅立叶变换的手工纸纤维取向分析方法研究<sup>①</sup>

刘 畅<sup>②\*</sup> 李晓岑\* 张小云\*

( \* 北京科技大学科学技术与文明研究中心 北京 100083 )

( \*\* 北京联合大学信息学院 北京 100101 )

**摘 要** 针对中国传统手工纸制作工艺灵活多样,制出的手工纸纤维取向分布存在差异的现实情况,进行了无损评价手工纸纤维取向的研究。针对纸张显微透射图像,设计了基于快速傅立叶变换(FFT)的纤维取向分析模型和评价参数。模拟实验验证了方法的可行性。用两种不同工艺、原料的手工纸实物进行了实验,与传统的抗张强度测试进行了比较,证明了方法的有效性。实验表明,该方法能够应用于手工纸纤维取向分析和纸张匀度评价。方法快速、无损,为手工纸分析提供了新途径。

**关键词** 手工纸,纤维取向,快速傅立叶变换(FFT),定量分析,无损分析

## 0 引 言

中国传统的造纸原料为植物纤维,纤维的长度、粗细、分布等属性决定了纸张的性能,纤维分布的方向性即取向是纸张匀度评价的关键参数。纸质文物保护的重要环节是载体纸张的分析。如何无损地测量纤维取向,进而评价纸张匀度,是有待解决的问题。

国内对纤维取向的研究主要集中于机制纸和非织造布,对手工纸的研究较少。已有的分析方法主要有抗张强度测试法、微波测定法<sup>[1]</sup>、X 射线衍射法<sup>[2]</sup>、图像分析法等。抗张强度测定简单易行,通过试样断裂时的抗张力来表示均匀度。但这属于有损检测,不适用于纸质文物分析。微波法测定是运用透射微波强度的差异来反映纸张纤维取向,测试需要专门的仪器。X 射线衍射法能测量纤维在纸平面方向、厚度方向和填料的取向,但实验仪器较贵,且对安装条件要求很高。随着图像分析技术的成熟,运用图像处理技术分析纤维取向已成为可选方案。国内外学者也已开展了相关研究工作。1999 年日本东京大学用快速傅立叶变换(FFT)分析了木纤维板的纤维取向<sup>[3]</sup>。2001 年英国拉夫堡大学对非织造布的扫描电子显微镜图片进行了数字图像处理,运用 FFT 分析了纤维的取向,实验效果良好<sup>[4]</sup>。

2005 - 2006 年,日本东京大学运用图像处理技术分析了中国古纸<sup>[5,6]</sup>,设计了线性插值法对傅立叶曲线进行了处理,提出的取向评价参数有效地反映了日本手工纸特征。1997 年中国华南理工大学制浆造纸工程国家重点实验室<sup>[7]</sup>通过分析纸张图像的灰度来评价纸页匀度。2009 年中国学者王丽<sup>[8]</sup>等提取非织造布图像中纤维之间孔洞的边缘线来对纤维的取向分布进行了测量,基于局部特征进行了分析,处理较复杂。调研表明,国外已经开展了基于 FFT 的纤维取向研究,并针对特定的应用领域设计了处理方法和评价参数。国内对手工纸纤维取向的研究尚未开展。本文针对中国传统手工纸,研究了基于傅立叶变换的纤维取向和纸张匀度评价问题,以期对手工纸无损分析提供支持。

## 1 取向分析模型

研究对象为中国传统手工纸,有别于在造纸机上抄造而成的机制纸。手工纸制造方式灵活多样,有左右荡帘、前后荡帘,还有不荡帘直接浇制。制作工艺决定了纸张纤维分布,因此不同工艺造出的纸张,匀度存在差异。如何无损、定量地测量纤维取向,进而评价手工纸匀度,是需要解决的问题。本研究在综合分析的基础上,设计了纤维取向分析模型

① 国家自然科学基金(61370138),国家文物局“指南针计划”(20090304)和北京联合大学新起点计划(zk201210)资助项目。

② 女,1978 年生,博士生;研究方向:手工纸图像分析技术;联系人,E-mail:liuchang@ buu. edu. cn  
(收稿日期:2013-01-09)

和评价参数,给出了处理流程(如图1所示)。

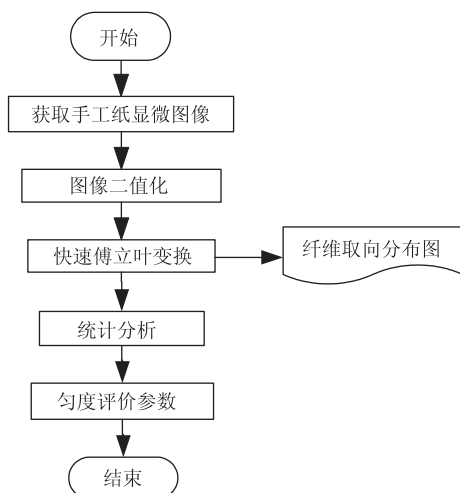


图1 纤维取向分析处理流程图

### 1.1 图像获取与预处理

取向分析模型对显微图像要求较高,图像必须能够清楚地区分出纤维与背景。由于手工纸纤维交织密集,显示出每根纤维的形态需要使用显微镜。实验采用的仪器是 XWY 造纸纤维测量仪。经多种拍摄方法比较,总结出使用透射光获取的图像效果最好。图2是物镜放大4倍、图像放大130倍、视野范围为3.4mm×4.3mm的白棉纸的显微图像。



图2 白棉纸放大约130倍

采集的图像为灰度图,为排除背景干扰,图像进行二值处理。采用 Otsu 算法选择最佳门限,将灰度图像处理为二值图像,完成预处理。

### 1.2 快速傅立叶变换(FFT)

傅立叶变换是把图像从空间域变换到频率域,因为在空间域很难观测到的特征,经常在频率域能明显地表示出来。傅立叶变换的这种特性,已广泛应用于如形状<sup>[9]</sup>、掌纹<sup>[10]</sup>、信号<sup>[11]</sup>等领域。图像  $f(x,y)$  经傅立叶变换后,将得到一个复函数

$F(u,v)$ 。在  $F(u,v)$  中,  $R(u,v)$  代表实部,  $I(u,v)$  代表虚部。本文关注的是二维离散傅立叶变换后的振幅和相角,它们的定义如公式

$$|F(u,v)| = \sqrt{R^2(u,v) + I^2(u,v)} \quad (1)$$

$$\theta(u,v) = \arctan\left[\frac{I(u,v)}{R(u,v)}\right] \quad (2)$$

所示。式(1)计算出的每个点的振幅,也称能谱,被规格化为灰度。式(2)计算出每个点的相角代表了方向性。傅立叶变换后,振幅关于原点是偶对称,相角关于原点是奇对称。振幅携带了图像的灰度信息,而相角则携带了图像的形状信息。因此,对图像中所有像素相角的能谱统计将体现图像的取向。

### 1.3 统计分析

统计模型中,横坐标是相角,纵坐标是每个方向的能谱之和。图像在频域关于相角是奇对称的,因此横坐标范围是  $[0^\circ, 180^\circ)$ 。

纵坐标是每个像素的某方向上的能谱和,它与图像大小有关。能谱值随图像像素的增加而增加,不同图像能级不同。为便于比较,进行了归一化处理。归一化方法是把横坐标平均分为18份,每10度组成一个单位。纵坐标是每个单位的能谱平均值比上整体均值。这样纵坐标变为相对量,与图像大小无关。

取向的均匀性反映在18个值中,为了度量18个值的波动,采用标准差作为曲线波动的评价参数。标准差越大,曲线越不稳定,代表纤维取向性越强,纸张分布不均匀;标准差较小,曲线较稳定,代表纤维各向同性,纸张分布较均匀。因此,归一化后的标准差成为反映纸张分布匀度的评价参数。

## 2 实验与结果

实验首先分析了两组模拟数据 M1 和 M2,分析结果见图3、图4。两个图中均有5条线,M1有交织,M2朝同一方向。图像经二值处理、快速傅立叶变换、归一化处理后,得到了反映图像取向的评价参数。M1的参数为0.25,M2的参数为0.38。两组模拟实验结果具有较大差异,第一组较第二组稳定,与直观观察结果吻合。

实物实验样本为来自不同产地,不同材料的皮纸 Y1 和麻纸 Y2,麻纸测试结果见图5。这两种纸均较薄,制作过程中没有施胶、染色、填粉等加工,因此图像清楚,显微图像效果较好。每张纸在不同部位,采集了6处图像,统计结果见表1。

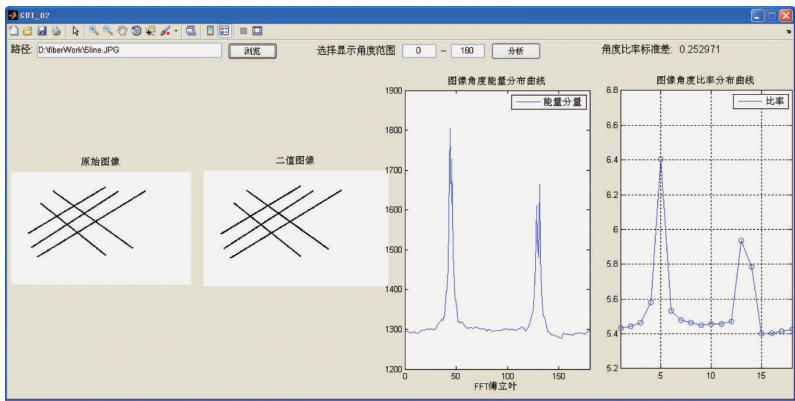


图3 M1 分析结果

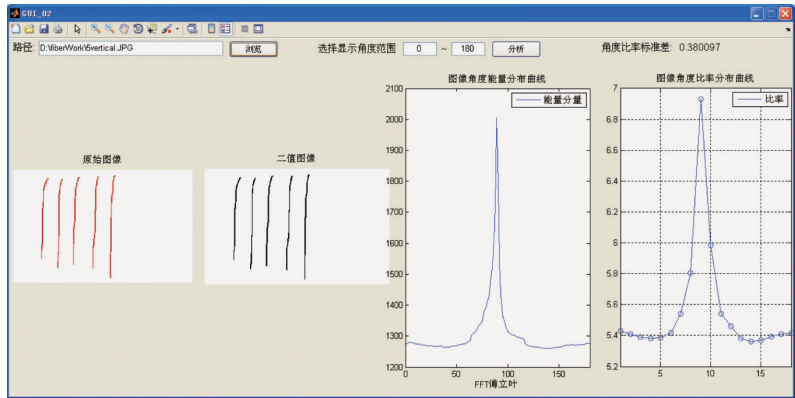


图4 M2 分析结果

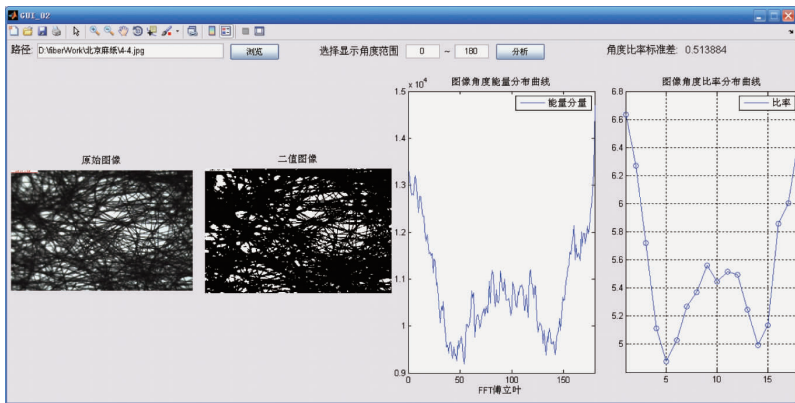


图5 麻纸 Y2 实验结果

表 1 FFT 与抗张强度分析结果

| 纸样 | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | FFT 分析 | 抗张强度比值 |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 皮纸 | 0.6025 | 0.6245 | 0.7972 | 0.5623 | 0.658  | 0.5547 | 0.633  | 1.980  |
| 麻纸 | 0.6267 | 0.4967 | 0.6277 | 0.5139 | 0.4733 | 0.5264 | 0.544  | 1.001  |

表 1 给出的 FFT 分析结果为多次测量的均值。检测结果表明,皮纸的偏差值偏大,6 组数据范围为  $[0.555, 0.797]$ , 平均波动值为 0.633。麻纸的波动范围为  $[0.473, 0.627]$ , 平均波动值为 0.544。波动范围和平均波动值都表明样本中麻纸较皮纸更稳

定,麻纸更均匀。

为验证实验结果,对两种样本进行了抗张强度测量。纸样被裁减为规格为  $25\text{cm} \times 1.5\text{cm}$  的纸条。横向和纵向分别取样,将横向与纵向的抗张拉力比值作为纸张均匀性评价指标。表 1 中抗张强度

比值为 10 次测量的平均值。实验结果为,皮纸的抗张比值为 1.980,麻纸为 1.001。麻纸小于皮纸,说明麻纸更均匀,与新方法结果一致。

### 3 结 论

本文针对中国传统手工纸,设计了基于傅立叶变换的纤维取向分析模型和纸张匀度评价参数。并开展了模拟实验、手工纸实物实验和抗张强度测试的对比实验,实验结果表明该方法能够对纸张的纤维取向做出定量分析,是纸张匀度评价的新途径。由于分析图像是普通光源的透射图,因此实验成本较低,但要求纸张较薄。较厚纸张的显微透射图像获取,还需尝试其他方法。研究成果可应用于纸质文物,为纸质文物分析提供无损、快速、绿色的方法。

#### 参考文献

- [ 1 ] 刘云飞,彭毓秀,故锡爵,等. 纸张纤维取向的微波测试分析. 中国造纸,1995,(6):28-31
- [ 2 ] 陶灵虎,阮锡根,洪传真,等. 纸张纤维及填料的 X 射线取向分析. 南京大学学报(自然科学版),1995,31(3):396-403
- [ 3 ] Murata K, Fujita M. FFT-estimation of fiber orientation on wood fiberboard. *Journal of the Society of Materials Science*, 1999, 48(1):77-82
- [ 4 ] Ghassemieh E, Versteeg H K, Acar M. Microstructural analysis of fiber segments in nonwoven fabrics using SEM and image processing. *International Nonwovens Journal*, 2001, 10(2):26-31
- [ 5 ] Han Y H, Emomae T, Isogai A, et al. Traditional paper-making techniques revealed by fiber orientation in historical papers. *Studies in Conservation*, 2006, 51(4):267-276
- [ 6 ] Emomae T, Han Y H, Isogai A. Nondestructive determination of fiber orientation distribution of fiber surface by image analysis. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2006, 21(2):253-259
- [ 7 ] 阎东波,刘焕彬. 纸页匀度的一种表征方法. 中国造纸, 1997,(6):6-11
- [ 8 ] 王丽,陈霞,陈廷. 基于图像处理的非织造布纤维取向分布测量. 华东大学学报(自然科学版),2009,35(1):84-89
- [ 9 ] Kunttu I, Lepisto L, Rauhamaa J, et al. Multiscale fourier descriptor for shape-based image retrieval. In: The 17th International Conference on Pattern Recognition Cambridge, UK, 2004. 765-768
- [ 10 ] Laadje M, Bouridane A, Kurugollu F. Eigenspectra palm-print recognition. In: The 4th IEEE International Symposium on Electronic Design, Test and Applications, Hong Kong, China, 2008. 382-385
- [ 11 ] Gupta V, Singh G, Mittal M, etc. Fourier transform of un-transformable signals using pattern recognition technique. In: 2010 Second International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies, Jakarta, Indonesia, 2010. 6-9

## Analysis of fiber orientation of handmade paper based on fast Fourier transform

Liu Chang<sup>\* \*\*</sup>, Li Xiaocen<sup>\*</sup>, Zhang Xiaoyun<sup>\*</sup>

( <sup>\*</sup> Research Center for Science Technology and Civilization, University  
of Science and Technology Beijing, Beijing 100083 )

( <sup>\*\*</sup> College of Information Technology, Beijing Union University, Beijing 100101 )

#### Abstract

Aiming at traditional Chinese handmade paper's great variety in fabricating process and obvious differences in fiber orientation, a study of fiber orientation of handmade paper was conducted. To realize non-destructive evaluation of fiber orientation, a new fiber distribution analysis model and a uniform evaluation parameter were introduced based on the fast Fourier transform (FFT). The feasibility of the method was verified through simulation experiments. Two kinds of handmade paper, bark paper and hemp paper, were tested by FFT testing and tensile strength testing. The experimental results show that this new method is suitable for analysis of fiber orientation of handmade paper. It provides a new, rapid, and non-destructive way for handmade paper analysis.

**Key words:** handmade paper, fiber orientation, fast Fourier transform (FFT), quantitative analysis, non-destructive analysis