

# 纸张表面形态立体观测及表征系统研究与应用

刘亭利, 陈广学

(华南理工大学, 广州 510640)

**摘要:** **目的** 研究纸张表面微观形态观测系统, 对纸张表面形态进行高精度的立体观测及细节表征。**方法** 通过组合 DT-400E 精密程控三维平移台和基恩士 LJV-7200 二维激光扫描仪, 开发高精度纸张表面形态立体观测及表征系统硬件部分, 扫描并传输纸张表面形态点云数据至计算机。研发系统软件部分的相应软件将得到的纸张表面形态数据进行处理、表征和分析。**结果** 该系统精确、直观地还原并分析了纸张的立体表面形态, 并使局部细节得到了详细表征, 其点云数据可应用于 3D 打印或其他方向。**结论** 利用该系统对样张扫描, 可以科学而准确地对纸张表面形态进行立体观测和分析, 为研究纸张表面形态对印品质量的影响提供了有效而新颖的手段。

**关键词:** 立体扫描; 纸张形态; 点云; 纸张质量; 扫描精度

**中图分类号:** TS807 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)15-0197-05

## Research and Application of System for Paper Surface Morphology Stereoscopic Observation and Characterization

LIU Ting-li, CHEN Guang-xue

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the microscopic observation system of paper surface and conduct high-precision stereoscopic observation and detail characterization of paper surface morphology. In combination with DT-400E precision program-controlled three-dimensional translation stage and KEYENCE LJV-7200 two-dimensional laser scanner, the hardware parts of high-precision stereoscopic observation and characterization system of paper surface were developed to scan and transmit print cloud data of paper surface morphology to the computer. The corresponding software of the system's software was researched and developed to obtain the paper surface morphology data for processing, characterization and analysis. The system accurately and visually restored and analyzed the stereoscopic surface morphology, and the local details were particularly characterized. The print cloud data could be applied in 3D printing or in other directions. With this system, the printing proofs can be scanned, and the stereoscopic observation and analysis on paper surface can be scientifically and accurately conducted, which provides effective and original methods for researching the effects of paper surface morphology on the print quality.

**KEY WORDS:** stereoscan; paper morphology; point cloud; paper quality; scanning accuracy

纸张是最常见的承印材料, 工业技术的发展使得不同领域中纸张都得到了广泛应用。对纸张本身质量的控制, 由质量控制系统(QCS)转向本体控制系统(MCS)<sup>[1]</sup>。同时, 人们对纸张表面性能的检测也提出了各类要求。针对纸张表面性能, J Boudreau 等已经进行了各类研究<sup>[2]</sup>。由于纸张由纤维、填料等物质交

织而成, 其平面存在不同程度的凹凸形态。表面微观形态的质量, 对于纸张<sup>[3-4]</sup>或纸张复合材料等方向如纸基印刷电子产品性能<sup>[5]</sup>有重要影响, 对于涂布纸张的质量也十分重要。Roger Bollström, Anni Määttänen 等<sup>[6]</sup>对纸张表面微观形态对涂布纸张的影响进行了探讨。目前在造纸行业中, 我国 GB/T 456—1989 规

收稿日期: 2017-01-22

作者简介: 刘亭利(1993—), 女, 华南理工大学硕士生, 主攻印刷包装材料与印刷图文处理。

通讯作者: 陈广学(1963—), 男, 博士, 华南理工大学教授、博导, 主要研究方向为数字印刷、3D 打印及印刷包装材料等。

定了采用别克式平滑度测定仪来测定纸张平滑度的方法去描述纸张表面的微观形态<sup>[7]</sup>, 针对纸张表面纤维的微观形态, 可利用原子力显微镜 (AFM) 和 X 射线光电子能谱 (XPS) 观测<sup>[8]</sup>。可选取平均粗糙度  $R_a$ 、均方根粗糙度  $R_q$  及自相关长度作为纸张表面微观形态的检测指标<sup>[9]</sup>, 也可通过 Image J 等图像处理方法分析纸张表面微观形态对印刷质量的影响<sup>[10-12]</sup>。未能有检测方法可以从硬软件结合获取纸张表面形态的立体细节点云数据, 并检测纸张表面任意细节微米精度级别的高度分布信息, 以及对纸张表面形态立体数据的三维建模和观测表征。针对以上问题, 文中研究了纸张表面形态立体观测及表征系统。

### 1 系统成员

该系统由硬件部分和软件部分共同组成。面向各类尺寸的纸张表面微观形态的三维建模和处理分析问题, 设计硬件部分利用二维线扫描仪和三维平移台, 根据激光三角法扫描采集纸张表面的微观形态。开发相应软件对扫描对象进行数据接收、幅面拼接和三维建模<sup>[13]</sup>等处理, 并实现点云数据的检测和精度分析。

#### 1.1 硬件部分

该系统硬件部分由二维激光扫描仪、精密程控三维平移台、真空载物吸盘及计算机组成, 见图 1。硬件中, 基恩士 LJV-7200 二维激光扫描仪的工作基于线性激光来测量纸张表面高度信息。该成员采用的测量原理为激光三角法<sup>[14]</sup>, 原理说明见图 2。

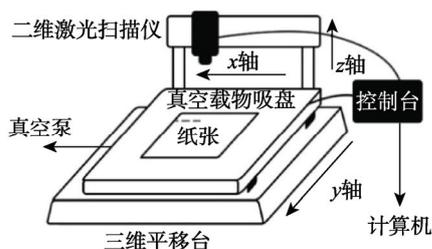


图 1 扫描系统硬件部分  
Fig.1 Hardware part of scanning system

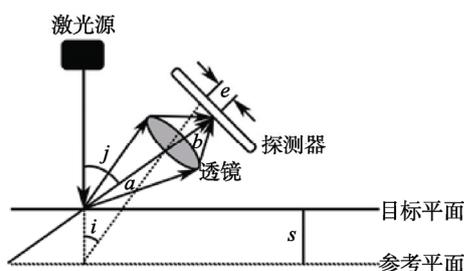


图 2 激光三角法原理  
Fig.2 The principle of laser triangulation

当扫描仪向被测纸张表面发射线性激光时, 激光经过纸张后产生漫反射。此时, 已偏移光带的像被扫

描仪传感器接收, 根据参考平面、像点、像距和光带偏移数据, 可得出纸张表面的高度。设 DT-400E 精密程控三维平移台的平移臂移动方向为  $x$  轴, 平移台移动方向为  $y$  轴, 垂直平移台方向为  $z$  轴, 则 LJV-7200 二维激光扫描仪在  $x$  轴方向重复精度可达  $20 \mu\text{m}$ , 在  $z$  方向重复精度可达  $1 \mu\text{m}$ 。

系统中, 将基恩士 LJV-7200 二维激光扫描仪安装在 DT-400E 精密程控三维平移台平移臂上, 实现二维扫描仪在  $x$  轴的往复运动。同时, 编写不同的平移台运动程式, 并通过教导盒控制平移台实现不同的运动过程, 以实现不同精度和不同幅面的纸张表面形态立体数据的采集, 控制流程见图 3。DT-400E 精密程控三维平移台的驱动为微步进级精密马达, 移动精度最高为  $0.001 \text{ mm}$ , 重复精度为  $\pm 0.01 \text{ mm}$ 。 $x$  轴方向, 平移臂最大移动距离为  $350 \text{ mm}$ ,  $y$  轴方向, 平移台最大移动距离为  $427 \text{ mm}$ 。同时, 在  $x, y$  轴上, 平移台最小运行速度为  $0.1 \text{ mm/s}$ , 最大为  $600 \text{ mm/s}$ , 综上可知可测量的纸张最大幅面为 A3。

为防止样张在平移台上的抖动和位移, 并确保纸张的相对平整, 在平移台上安装真空载物吸盘, 并连接真空泵对纸张进行抽真空。在红外光电开关和限位装置的辅助下, DT-400E 精密程控三维平移台通过控制台和计算机通信传递数据。

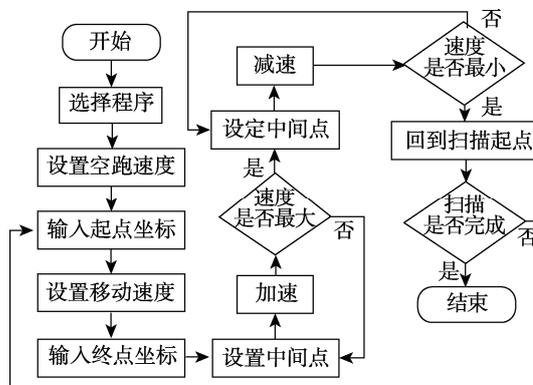


图 3 扫描控制流程  
Fig.3 Scanning control process

#### 1.2 软件部分

系统软件部分基于 Windows 平台, 由 VS2010 开发环境下微软基础类库开发。利用库中 CWinThread 类中的多线程操作函数 AfxBeginThread(), 创建扫描数据采集线程。利用基于 CPU 晶振次数的微秒级定时器, 通过函数获取计算机实时时钟频率和晶振次数, 以获取  $y$  坐标信息。设发生事件前时间为  $t_1$ , 发生事件后时间为  $t_2$ , CPU 晶振频率<sup>[15]</sup>为  $f$ , 得时间间隔:

$$t = \frac{t_2 - t_1}{f} \tag{1}$$

将安装在三维平移台平移臂上的二维扫描仪传感器扫描接收的每一行点云数据通过控制台和计算

机 USB 接口传输, 储存点云数据至置于计算机内的处理软件, 后续进行纸张表面形态点云数据的拼接、处理和分析。设置处理的纸张最大高度为 8 mm。

硬件部分扫描前, 三维平移台平移臂上的二维激光扫描仪位于原点(0, 0, 0)。此时限位器挡板将红外光电开关遮挡, 判断激光扫描仪未到达扫描起点, 点云数据不予储存。扫描程式开始, 平移臂沿  $x$  轴到达扫描起点(300, 0, 0)时, 平移台  $y$  轴开始移动, 限位器挡板不再遮挡红外光电开关, 扫描仪将读取的纸张单行表面高度信息传递给软件, 结合三维平移台的坐标数据, 软件获取并储存单行点云数据。

根据软件读取和存储单行数据的时间为 18 ms, 设置 25 ms 的采样周期, 进行下一行纸张表面形态点云数据的采集。由于采样周期稳定, 系统对每一幅面的扫描行数  $N$  相同, 设测试样张的实际扫描尺寸为  $L$ , 则获取  $y$  坐标为:

$$y_j = \frac{L}{N} \times j, j=1, 2, 3 \dots N \quad (2)$$

软件获取纸张表面点云坐标后, 进行点云拼接, 为确保点云信息的完整, 设置平移臂每次平移距离为 78 mm, 使得相邻幅面的点云数据在  $x$  轴存在理论上 2 mm 的重叠, 重叠部分在后续点云稀化中处理, 并对点云三角构网, 完成数据的立体建模, 以便对纸张表面形态进行观测和分析。

## 2 实验

材料: 油画、4 类市售某品牌特种纸。设备: 基恩士 LJV-7200 二维激光扫描仪、DT-400E 精密程控三维平移台、真空载物吸盘、真空泵、相应处理软件。实验步骤: 采用纸张表面形态立体观测系统, 在 DT-400E 精密程控三维平移台上放置待测纸张, 同时使平移台上的真空载物吸盘连接真空泵, 打开真空泵以保持纸张的平整, 在计算机上打开系统相应的软件程序, 利用二维激光扫描仪传感器自带软件 LJ-Navigator2 对纸张表面的  $z$  坐标的进行倾斜补偿, 补偿范围为  $\pm 45^\circ$ [16]。将平移台归位后, 在软件中选择扫描规格及精度: A3/B4/16K, A4/B5/8K, A5/B6/B7, A7/A8 等 4 种幅面规格及 320, 160, 80, 32  $\mu\text{m}$  等 4 种行间距精度, 确定系统硬件部分移动控制程序。

由二维激光扫描仪通过线激光扫描, 获取  $x$  轴和  $z$  轴的纸张表面立体数据后, 结合三维平移台读入  $y$  轴纸张表面立体数据。完成立体数据获取, 传输至计算机。利用软件获得并读取、拼接纸张表面的立体数据。根据所获得的点云信息, 通过算法稀化, 对纸张表面区域进行选择。并对选择区域的形貌三角构网, 三维重建, 同时通过数据纸张表面形态进行分析。对三维建模的纸张表面形态进行观测, 可根据软件对纸张表面进行分层, 绘制高度直方图, 并选取合适的创

面对纸张表面任意点的  $z$  值进行对比分析, 在此基础上确定纸张表面形态是否满足所需的质量标准。实验得样品点云拼接建模见图 4, 原图见图 5。实验验证得出, 相邻幅面扫描起点为同一直线, 拼接痕迹较小, 效果良好, 纸张表面形态立体观测性良好, 局部高度细节特征明显, 没有明显偏差。

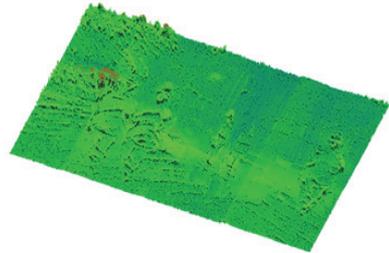


图 4 基于点云拼接的局部建模  
Fig.4 Local regression based on point cloud registration



图 5 绘有油画的纸张局部细节  
Fig.5 Local detail of paper with oil painting

## 3 结果分析

观察系统扫描得到的纸张表面形态立体模型, 并将点云数据以 TXT 格式存储。对得到的点云数据可进行三角构网、高度分层等处理, 对纸张表面形态进行分析 and 表征。

### 3.1 纸张立体形态

选取纸张样品并进行扫描, 选择区域并对点云进行稀化后利用 OpenGL 和相关算法对点云坐标进行三角构网, 得到其表面形态模型见图 6。观察可知所选区域纸张表面纹路较为平整, 印刷样张质量良好。所选区域纸张表面左侧纹路凹槽  $z$  轴深度较中间偏低。所得三维数据可导入其他软件进行分析。

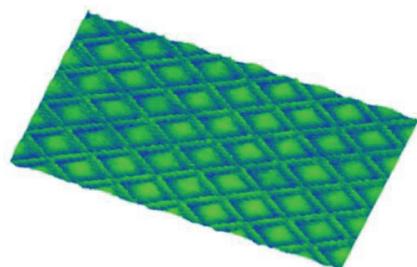


图 6 基于三角构网的局部建模  
Fig.6 Local regression based on generating triangulation

### 3.2 纸张表面高度分布

选取4种纸面样张,并确定局部区域,对该区域纸张表面的三维信息进行采集后,由三角构网获得表面 $x$ 轴、 $y$ 轴平面的二维形态,见图7。将样本点云信息高度细分为200份,对其进行分层并绘制高度直方图。并设横坐标为纸张表面高度,单位为mm,纵坐标为每层纸面高度坐标所占点数,见图8。由系统软件可知所选各样本点云数分别为77 572, 42 488, 54 981, 81 654个,其点云信息见表1。

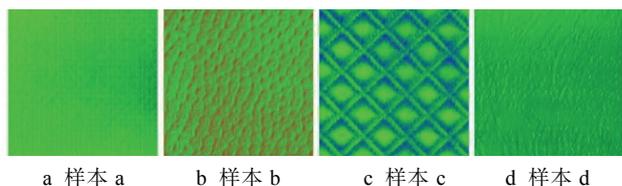


图7 不同纸张表面二维形态  
Fig.7 2D images of different paper surfaces

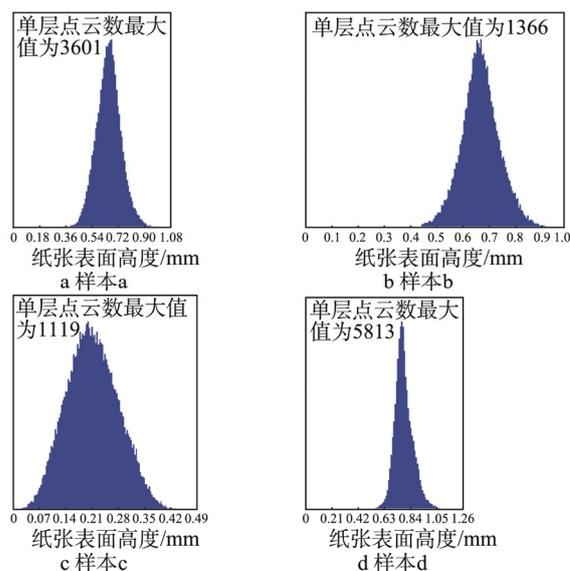


图8 纸张表面高度直方图  
Fig.8 Paper surface height histogram

表1 样本区域点云信息  
Tab.1 Point cloud data of sample area

轴	样本 a		样本 b		样本 c		样本 d	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
$x$	31.154	66.918	96.959	114.841	33.538	62.785	29.167	63.977
$y$	-60.200	-26.000	-29.800	-11.100	-41.300	-11.700	-49.600	-12.600
$z$	-34.057	-32.227	-34.093	-33.115	-34.179	-33.489	-34.575	-32.445

观察图8并结合所采集点云数据,得到样本a表面高度峰值为第76层,高度为0.695 mm,点云占总数的百分比为4.642%。样本b表面高度峰值为135层,高度为0.660 mm,点云占总数的百分比为3.215%。样本c表面高度峰值为第58层,高度为0.200 mm,点云占总数的百分比为2.035%。样本d表面高度峰值为第74层,高度为0.788 mm,点云占总数的百分比为7.119%。由数据得,纸张表面高度分布得到良好表征。

### 4 结语

该系统独创性地通过将二维激光扫描、三维平移台以及真空载物吸盘相互连接结合,硬、软件结合,扫描并获取纸张整体或局部表面形态的三维点云数据,如纸张表面任意区域 $z$ 轴高度和高度分布信息,以及对纸张表面微观形态立体数据的建模和观测,其TXT点云数据可用于3D打印等方向。实现了对纸张表面形态进行高度、纹理分布、孔隙分布及其他立体细节信息的检测和表征,丰富了纸张表面性能的观测、表征和评价体系,对纸张性能的评价领域有一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] 钟益联. 纸张质量控制功能及其实现方式[J]. 中国造纸, 2014, 33(3): 44—50.  
ZHONG Yi-lian. Web Quality Control Function and Its Implementation[J]. China Pulp & Paper, 2014, 33(3): 44—50.
- [2] BOUDREAU J, GERMGÅRD U. Influence of Various Pulp Properties on the Adhesion Between Tissue Paper and Yankee Cylinder Surface[J]. Bioresources, 2014, 9(2): 2107—2114.
- [3] 黄学林, 蒋文燕. 纸张表面特性对数字印刷色彩再现的影响[J]. 中国造纸, 2014, 33(12): 29—32.  
HUANG Xue-lin, JIANG Wen-yan. Influence of Surface Characteristics of Paper on Digital Printing Color Reproduction[J]. China Pulp & Paper, 2014, 33(12): 29—32.
- [4] 郭倩, 陈广学. 纸张表面性能对调频加网数字印刷图像阶调密度的影响[J]. 包装工程, 2014, 35(13): 139—143.  
GUO Qian, CHEN Guang-xue. Influence of Paper Surface Properties on Image Tone Density during Digital Printing of Frequency Modulated Screening[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(13): 139—143.
- [5] REIS M S, SARAIVA P M. Analysis and Classification

- of the Paper Surface[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2010, 49(5): 2493—2502.
- [6] BOLLSTRÖM R, MÄÄTTÄNEN A, TOBJÖRK D, et al. A Multilayer Coated Fiber-based Substrate Suitable for Printed Functionality[J]. *Organic Electronics*, 2009, 10(5): 1020—1023.
- [7] 李小龙. 纸张表面微观形貌的分析与表征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.  
LI Xiao-long. Analysis and Characterization of Paper Surface Micro-topography[D]. Changzhou: South China University of Technology, 2014.
- [8] 李建国, 张红杰, 李海龙, 等. CLSM 技术在纤维表面形态和纸张结构研究中的应用[J]. *中国造纸*, 2014, 33(8): 66—70.  
LI Jian-guo, ZHANG Hong-jie, LI Hai-long, et al. Application of CLSM Technology in the Study of Fiber Surface Characteristics and Paper Sheet Structure[J]. *China Pulp & Paper*, 2014, 33(8): 66—70.
- [9] SAMYN P, ERPS J V, THIENPONT H, et al. Paper Coatings with Multi-scale Roughness Evaluated at Different Sampling Sizes[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(13): 5613—5625.
- [10] 薛美贵, 章理, 田乐园. 图像处理法分析纸张表面孔隙对胶印质量的影响[J]. *包装工程*, 2016, 37(7): 161—165.  
XUE Mei-gui, ZHANG Li, TIAN Le-yuan. Effect of Paper Surface Porous on Off-set Image Quality[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(7): 161—165.
- [11] 张岩, 李仁爱, 曹云峰. 基于图像技术的喷墨打印纸表面孔隙分析[J]. *包装工程*, 2015, 36(9): 129—133.  
ZHANG Yan, LI Ren-ai, CAO Yun-feng. Pore Analysis of Inkjet Paper Surface Based on Image Technology[J]. *Packaging Engineering*, 2015, 36(9): 129—133.
- [12] 薛美贵, 杨玉春, 邢文文, 等. 印刷用纸孔隙结构分析[J]. *包装工程*, 2015, 36(3): 129—133.  
XUE Mei-gui, YANG Yu-chun, XING Wen-wen, et al. Porous Structure Analysis of Printing Paper and Board[J]. *Packaging Engineering*, 2015, 36(3): 129—133.
- [13] 李泉, 程效军. 自定位手持式三维激光扫描仪精度测试与分析[J]. *测绘通报*, 2016(10): 65—68.  
LI Quan, CHENG Xiao-jun. Investigating Hand-held Laser Scanner Accuracy[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(10): 65—68.
- [14] 冯翠芝. 基于线激光三角法的目标深度探测[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.  
FENG Cui-zhi. Target Depth Detection Based on the Liner Laser Triangulation[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [15] 刘虹, 庞佑兵, 何开全, 等. 一种微调晶振频率的软件实现方法[J]. *微电子学*, 2014(5): 647—650.  
LIU Hong, PANG You-bing, HE Kai-quan, et al. A Software Method for Calibrating Crystal Oscillator Frequency[J]. *Microelectronics*, 2014(5): 647—650.
- [16] JIANG Z, LIU S. Self-calibration of Varying Internal Camera Parameters Algorithm Based on Quasi-affine Reconstruction[J]. *Journal of Computers*, 2012, 7(3): 744—778.